



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние длины волны лазерного излучения при УФ-лазерной обработке на структуру и функциональные свойства сплава TiNi

Татьяна Саблина^{a,*}, Марина Кандаурова^b, Илья Затиков^c, Юрий Панченко^d

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/3, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-5941-5732>, sabltat@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-0236-2227>, panchenko.marina4@gmail.com;
^c <https://orcid.org/0000-0003-3219-9299>, zyatikov@lgl.hcei.tsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-8017-7268>, yu.n.panchenko@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 544.032.65

История статьи:

Поступила: 08 октября 2025

Рецензирование: 17 октября 2025

Принята к печати: 31 октября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Ультрафиолетовое лазерное излучение

Длина волны излучения

Модификация поверхности

Лазерная обработка

Смачиваемость

Сплав TiNi

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31008, <https://rscf.ru/project/25-79-31008/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. Широкое внедрение функциональных сплавов на основе TiNi в медицине требует целенаправленного управления их поверхностными свойствами, такими как смачиваемость и биосовместимость. Одним из перспективных методов модификации поверхности является лазерная обработка, в особенности в УФ-диапазоне. Эффективность УФ-лазерной обработки обусловлена высокой энергией фотонов,енным поглощением в металлах и малой глубиной зоны термического влияния. Целью данной работы является исследование влияния длины волны УФ-лазерного излучения (266 и 355 нм) на структурно-фазовое состояние, химический состав и смачиваемость поверхности сплава TiNi для последующего управления функциональными свойствами материала. **Материалы и методы исследования.** Модификация поверхности образцов TiNi проводилась импульсным Nd:YAG-лазером с длинами волн 266 и 355 нм в воздушной среде. Для анализа результатов использовались растровая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией и рентгенофазовый анализ для изучения микроструктуры, элементного и фазового состава. Смачиваемость оценивали методом сидячей капли. На основе данных по контактному углу смачивания рассчитывали свободную поверхностную энергию и ее дисперсионную и полярную составляющие по методу ОВРК. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что УФ-лазерная обработка при варьировании таких параметров, как длина волны излучения и скорость лазерного сканирования, приводит к изменению морфологии, количественного соотношения элементов, фазового состава поверхностного слоя образцов сплава TiNi и его поверхностных свойств. После УФ-лазерного воздействия с длиной волны 355 и 266 нм при низких скоростях сканирования ($V = 200$ и 500 мкм/с) на поверхности образцов регистрируются единичные микротрецины или сетка микротрецин, вызванные влиянием зоны термического воздействия. После УФ-лазерной обработки количество кислорода на поверхности TiNi по сравнению с исходным состоянием увеличивается в 5–18 раз. Фазовый состав никелида титана также претерпевает заметные изменения: на поверхности после лазерного воздействия регистрируются фазы, принадлежащие оксидам титана. Воздействие излучения с более высоконергетичными фотонами ($\lambda = 266$ нм) на поверхность TiNi приводит к ярко выраженному изменению морфологии и свойств поверхности по сравнению с излучением с длиной волны 355 нм в идентичных режимах. Продемонстрировано, что УФ-лазерная обработка приводит к значительному повышению гидрофильности поверхности: контактный угол смачивания уменьшается с $\sim 75^\circ$ в исходном состоянии до $\sim 25^\circ$ и $\sim 11^\circ$ после обработки излучением с длинами волн 355 и 266 нм соответственно. Кроме этого, наблюдается рост свободной поверхностной энергии образцов TiNi преимущественно за счет значительного увеличения ее полярной составляющей.

Для цитирования: Влияние длины волны лазерного излучения при УФ-лазерной обработке на структуру и функциональные свойства сплава TiNi / Т.Ю. Саблина, М.Ю. Кандаурова, И.А. Затиков, Ю.Н. Панченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 257–271. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-257-271.

Введение

Сплавы на основе никелида титана (TiNi) занимают важное место в ряду функциональных материалов благодаря уникальным свойствам, таким как эффект памяти формы и сверхэластичность, что делает их востребованными для ис-

пользования в медицине (имплантаты, стенты), аэрокосмической промышленности и микроэлектронике [1–3]. Однако успешное применение TiNi в значительной степени зависит от его поверхностных свойств, включая смачиваемость, которая влияет на биосовместимость и коррозионную стойкость сплава [4]. Поэтому внимание ученых направлено на поиск эффективных методов обработки поверхности этих сплавов для улучшения их биофункциональных свойств. Современные стратегии модификации поверхности функциональных материалов включают

*Адрес для переписки

Саблина Татьяна Юрьевна, к.т.н., научный сотрудник
 Институт сильноточной электроники СО РАН,
 пр. Академический, 2/3,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 913 843-21-78, e-mail: sabltat@mail.ru

в себя широкий спектр методов, таких как ионная имплантация [5], высокоэнергетические методы (лазерные, электронно-лучевые, плазменные) [6, 7], термические и химические методы [8], нанесение покрытий [9] и др. Особое место среди высокоэнергетических методов занимает лазерная обработка, отличающаяся прецизионностью, бесконтактностью, экологической безопасностью и высокой скоростью воздействия [6, 10]. Важным преимуществом лазерных технологий модификации поверхности является возможность точного контроля изменения параметров микроструктуры, химического состава и топографии поверхности, что открывает перспективы для целенаправленного управления ее функциональными свойствами.

Многие исследования подтверждают положительное влияние лазерной обработки на коррозионную стойкость и биосовместимость сплавов на основе TiNi, в частности, за счет снижения миграции ионов никеля в физиологическую среду [11–15]. В работе [11] было показано, что обработка Nd:YAG-лазером ($\lambda = 1064$ нм) улучшает коррозионную стойкость благодаря формированию защитного оксидного слоя, хотя чрезмерное оплавление материала может локально усилить высвобождение ионов никеля с поверхности TiNi. В свою очередь, Ц. Чжан с соавторами [12] продемонстрировали, что ультракороткие лазерные импульсы позволяют не только управлять смачиваемостью, но и создавать ее градиенты, это приводит к улучшению антиадгезионных свойств и снижению гемолитической активности TiNi. В работе [13] показано, что текстурирование фемтосекундными лазерными импульсами ($\lambda = 1028$ нм) создает на поверхности сплава TiNi иерархические структуры, которые значительно улучшают смачиваемость и способствуют эндотелизации. Другая работа [14] свидетельствует о том, что лазерно-индуцированные изменения оксидного слоя придают поверхности антибактериальные свойства, снижая адгезию *Staphylococcus aureus*. Кроме того, в работе [15] установлено, что управление параметрами фемтосекундной лазерной ($\lambda = 1035$ нм) микрообработки позволяет достичь низкой шероховатости поверхности порошковых образцов TiNi, это способствует улучшению биосовместимости и устойчивости к биокоррозии.

Тем не менее систематические исследования, посвященные влиянию лазерной обработки на смачиваемость и биосовместимость сплавов на основе никелида титана, остаются ограниченными. Несмотря на указанные достижения, задача управления смачиваемостью поверхности TiNi лазерными методами далека от завершения и требует углубленных исследований, особенно для промышленного внедрения. При этом малоизученной областью является применение ультрафиолетового (УФ) лазерного излучения для модификации поверхности сплава TiNi.

Лазерное излучение в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda = 100\ldots400$ нм) обладает большей энергией фотонов и более сильным поглощением для металлов, что приводит к меньшей глубине проникновения и снижению размеров зоны термического влияния по сравнению с излучением видимого и инфракрасного диапазонов [10, 16]. Так, в работе [17] нами было установлено, что локальное воздействие УФ-лазерного излучения ($\lambda = 266$ нм) на нержавеющую сталь и сплав TiNi приводит к значительному повышению гидрофильности поверхности благодаря оксидированию и увеличению полярной составляющей свободной поверхностной энергии. И. Ванг с соавторами [18] показали, что воздействие наносекундного УФ-лазерного излучения ($\lambda = 355$ нм) позволяет создавать на поверхности титанового сплава контролируемую текстуру с шероховатостью ~ 5 мкм, обеспечивающую высокую клеточную адгезию и пролиферацию. В работе [19] было установлено, что наноструктурирование поверхности с помощью лазера с длиной волны $\lambda = 355$ нм улучшает адгезию и пролиферацию остеобластов на сплаве TiNi. Таким образом, несмотря на доказанную эффективность УФ-лазерной обработки, в литературе отсутствуют данные по комплексному изучению влияния ее параметров на характеристики поверхности и смачиваемость металлических материалов. Большинство существующих работ используют фиксированную длину волны (часто 266 нм или 355 нм), а систематические исследования, варьирующие длину волны при контролируемых условиях, отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование влияния длины волны УФ-лазерного излучения (266 нм и 355 нм) на структурно-фазовое состояние, химический состав и смачива-

емость поверхности сплава TiNi для последующего управления функциональными свойствами материала.

Задачи исследования:

- проведение сравнительного анализа морфологии, химического и фазового состава поверхности образцов TiNi до и после УФ-лазерной обработки с различными параметрами (длина волны, скорость сканирования);

- оценка степени гидрофильности поверхности путем измерения контактных углов смачивания и расчета свободной поверхностной энергии с определением дисперсионной и полярной составляющих исследуемых образцов TiNi, подвергнутых УФ-лазерным обработкам по разным режимам;

- выявление закономерностей влияния длины волны (266 нм и 355 нм) излучения при УФ-лазерной обработке на структурно-фазовое состояние и функциональные свойства модифицированной поверхности сплава TiNi.

Материалы и методы исследования

Образцы для исследования представляли собой пластины размерами $10 \times 10 \times 3$ мм из сплава TiNi марки ТН-10 (химический состав 50,0...51,5 % Ni, 0,5...1,5 % Mo, 0,5 % Fe, ост. Ti, ат. %, условное обозначение – TiNi). Для обеспечения одинаковой исходной топографии поверхности всех образцов были проведены стандартные процедуры пробоподготовки. Все исследуемые образцы механически шлифовали, а затем выполняли финишную полировку с использованием алмазных паст (АСМ и АСН с градацией размера абразива от 3/2 до 1/0 мкм) для получения гладкой зеркальной поверхности. Для окончательной очистки от загрязнений об-

разцы промывали в ультразвуковой ванне с этиловым спиртом в течение 10 минут.

Воздействие на подготовленную поверхность образцов осуществляли импульсным излучением Nd:YAG-лазера (LS2137U, Lotis II, Беларусь) в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. В работе использовали лазерное излучение третьей (355 нм) и четвертой (266 нм) гармоник. Обработку поверхности материалов проводили в воздушной среде при атмосферном давлении и комнатной температуре (22 ± 3 °C). Основные параметры УФ-лазерной обработки поверхности образцов представлены в таблице. Схема установки для УФ-лазерной обработки и стратегия лазерного сканирования приведены на рис. 1.

Рентгенофазовый анализ (РФА) применялся для исследования изменений в структуре и фазовом составе сплава TiNi в результате УФ-лазерной обработки по различным режимам. Дифракционные картины регистрировали на дифрактометре типа ДРОН «Буревестник» (Российская Федерация). В качестве источника излучения использовали медный анод (CuKa-излучение, $\lambda = 1,5418$ Å), измерения проводили в диапазоне углов 2θ от 30° до 100° . Значение параметра кристаллической решетки (a) находили путем экстраполяции зависимости a_{hkl} , определенных для каждой рентгеновской линии с индексами (hkl), от функции $0,5(\cos^2\theta/\sin\theta + \cos^2\theta/\theta)$.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) применялась для исследования микроструктуры и элементного состава поверхности исследуемых образцов до и после УФ-лазерной обработки. Исследования проводили на микроскопе TESCAN VEGA 3 (Чешская Республика), который оснащен энергодисперсионным спектрометром (ЭДС). С целью статистической оценки

Параметры УФ-лазерной обработки

UV laser treatment parameters

Длина волны, нм / Wavelength, nm (λ)	Длительность импульса, нс / Pulse duration, ns	Частота следования импульсов, Гц / Pulse repetition rate, Hz	Диаметр лазерного пятна, мм / Laser spot diameter, mm (d_0)	Плотность энергии, Дж/см ² / Fluence, J/cm ² (J)	Скорость сканирования, мкм/с / Scanning speed, μm/s (V)
266	7	10	3,5	0,22	200...5000
355	7	10	3,5	0,22	200...5000

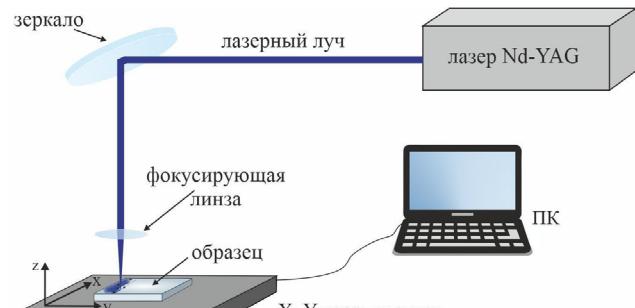
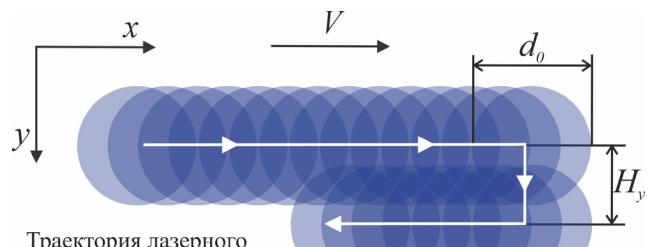
*a**b*

Рис. 1. Схема экспериментального стенда для УФ-лазерной обработки поверхности образцов (а) и используемая стратегия сканирования (б). На схеме (б) обозначены диаметр лазерного пятна (d_0), шаг между линиями сканирования (H_y) и скорость сканирования (V)

Fig. 1. Schematic of the experimental setup for UV laser surface treatment (a) and the scanning strategy employed (b). Diagram (b) illustrates the laser spot diameter (d_0), hatch distance (H_y), and scanning speed (V)

элементного состава ЭДС-анализ выполнялся в нескольких (не менее 10) случайно выбранных областях для каждого исследуемого образца.

Смачиваемость поверхности до и после УФ-лазерной обработки оценивали методом сидячей капли с использованием жидкостей с известными значениями поверхностного натяжения. Капли объемом 3 мкл наносили на поверхность образцов с помощью автоматической микропипетки. После нанесения капли выдерживали в течение 60 секунд для стабилизации формы, после чего регистрировали их изображение с помощью цифрового микроскопа Levenhuk Discovery Artisan 1024. Значения контактного угла усредняли по результатам не менее пяти измерений. Для количественной оценки изменений поверхностных свойств материалов в результате УФ-лазерной обработки проводили оценку свободной поверхностной энергии (γ_{total}) и ее составляющих. Расчеты выполняли в соответствии с методом Оунса – Венданта – Рабеля – Кельбле (ОВРК) [20, 21], позволяющим раздельно оценить вклад дисперсионной (γ_d) и полярной (γ_p) составляющих в общую поверхностную энергию.

Результаты и их обсуждение

РЭМ-изображение структуры и элементный состав исходного образца сплава TiNi приведены на рис. 2, а. Видно, что структура сплава TiNi преимущественно однородная, в матрице (светлая область на рис. 2, а) присутствует неболь-

шая доля ($\leq 5\%$) включений вторичной фазы (на рис. 2, а частицы темного цвета). Результаты ЭДС-анализа, представленные на рис. 2, а, показали, что кроме основных компонентов матрицы Ti и Ni обнаружено небольшое количество легирующих элементов сплава ТН-10, таких как Fe и Mo, а также незначительное содержание C и O. Темные включения представлены в основном элементами Ti, C и малым количеством Ni, присутствие которого в спектрах может быть обусловлено матрицей, окружающей данные частицы. На основании элементного анализа светлая матрица соответствует никелиду титана (TiNi), а темные включения – карбиду титана (TiC), что также подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии. Дифракционные пики на представленной рентгенограмме (рис. 2, б), полученные с поверхности исходного образца, являются пиками дифракции B2-фазы TiNi, и в области малых углов регистрируется пик, принадлежащий TiC. Параметр кристаллической решетки B2-фазы в исходном состоянии равен $a = 0,3018 \pm 0,004$ нм.

Исследования структуры, элементного и фазового состава сплава TiNi после УФ-лазерной обработки показали, что УФ-лазерное воздействие при изменении таких параметров, как длина волны и скорость лазерного сканирования, приводят к изменениям в морфологии, элементном и фазовом составе поверхностного слоя образцов сплава TiNi. На рис. 3 приведены РЭМ-изображения структуры и элементный состав поверхности образцов сплава TiNi после

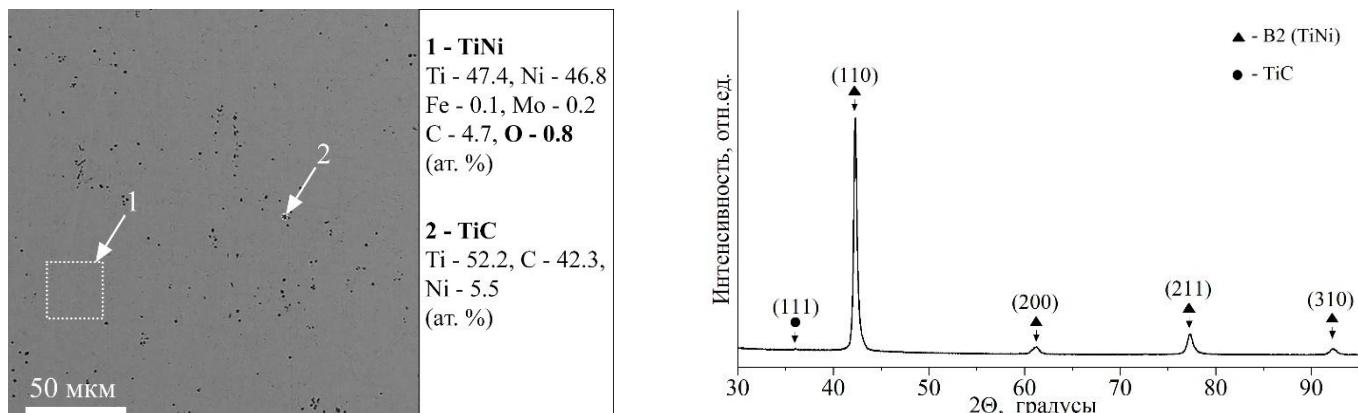


Рис. 2. РЭМ-изображение с результатами ЭДС-анализа (а) и дифрактограмма (б) поверхности образца TiNi в исходном состоянии (без обработки)

Fig. 2. Microstructural and compositional characterization of the untreated TiNi specimen surface: (a) SEM micrograph with corresponding EDS elemental mapping; (b) X-ray diffraction pattern

ультрафиолетового лазерного воздействия с длиной волны 355 нм (рис. 3, а, в) и 266 нм (рис. 3, б, г) при скорости лазерного сканирования 500 мкм/с (рис. 3, а, б) и 200 мкм/с (рис. 3, в, г).

Из рис. 3 видно, что после обработки УФ-лазером с длинами волн 355 нм и 266 нм при скорости сканирования 500 мкм/с морфология поверхности материала сохраняется неизменной (рис. 3, а, б). Однако на поверхности TiNi после УФ-лазерной обработки с длиной волны 266 нм выявляются отдельные микротрешины (желтые стрелки на рис. 3, б). Элементный состав поверхности TiNi после таких режимов лазерной обработки не изменяется, но происходит изменение количественного соотношения его элементов. При сравнении содержания кислорода на исходной и модифицированной УФ-лазерным излучением поверхности TiNi выявлено, что количество кислорода после УФ-воздействия увеличивается в 5–8 раз. Причем количество кислорода на поверхности образцов TiNi примерно в 1,5 раза выше после УФ-воздействия с более короткой длиной волны, чем после воздействия с длиной волны 355 нм. Из рис. 3, в, г видно, что при минимальной скорости сканирования, равной 200 мкм/с, при УФ-лазерном воздействии независимо от длины волны лазерного излучения на поверхности образцов сплава TiNi регистрируется равномерная сетка микротрещин. При этом на поверхности образцов, обработанных УФ-лазером с длиной волны 266 нм и скоростью сканирования 200 мкм/с, микрорастрескивание проявляется более выраженно.

Образование единичных микротрещин и усиленное микрорастрескивание тонкого поверхностного слоя после обработки ультрафиолетовым лазером обусловлено несколькими основными причинами, связанными с физико-химическим воздействием лазерного излучения на материал. Высокая энергия УФ-лазерного излучения вызывает быстрый и локальный нагрев поверхности, что приводит к резкому тепловому расширению и последующему возникновению значительных термических напряжений на поверхности материала. Ультрафиолетовое излучение с длиной волны от 100 до 400 нм обладает меньшей глубиной проникновения в материал по сравнению с инфракрасным или видимым лазерным излучением, что концентрирует энергию в тонком поверхностном слое и увеличивает температурный градиент между поверхностью и основой материала. Такой градиент усиливает внутренние напряжения и стимулирует микротрецинообразование. На микрорастрескивание может оказывать влияние и разница коэффициентов линейного теплового расширения материала основы TiNi и оксидов металла, образующихся на поверхности сплава при лазерном воздействии [17, 22].

Скорость сканирования также влияет на процессы трещинообразования: при низкой скорости сканирования обработка более интенсивна по времени воздействия на локальный участок, что усиливает тепловую нагрузку и риск трещинообразования. По данным ЭДС-анализа (рис. 3) в слое толщиной до 3 мкм при УФ-лазерном

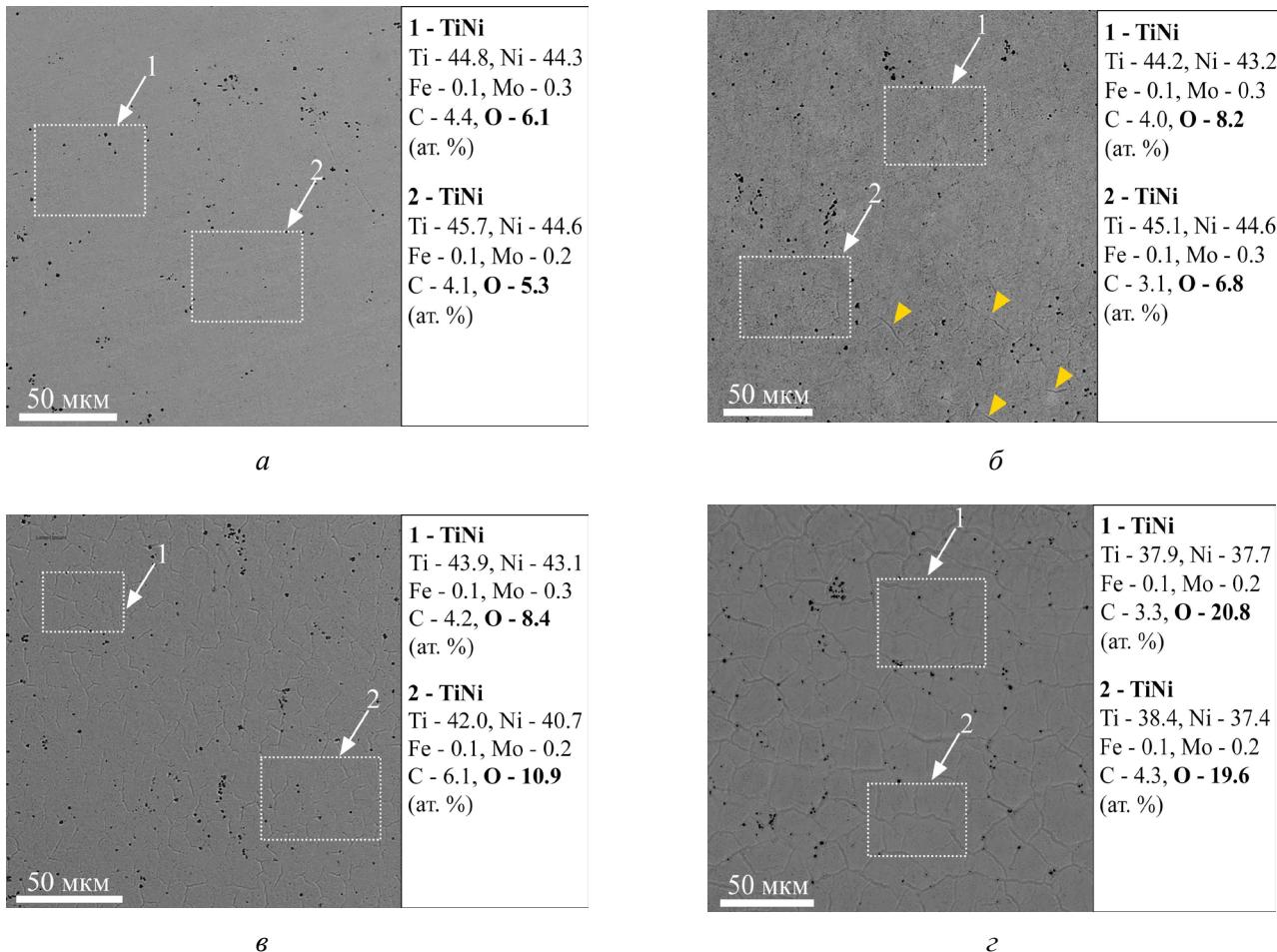


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности сплава TiNi после УФ-лазерной обработки с различными параметрами и результаты ЭДС-анализа:

$\lambda = 355$ нм, $V = 500$ мкм/с (a); $\lambda = 266$ нм, $V = 500$ мкм/с (b); $\lambda = 355$ нм, $V = 200$ мкм/с (c); $\lambda = 266$ нм, $V = 200$ мкм/с (d)

Fig. 3. SEM images of the TiNi alloy surface after UV laser treatment with different parameters and corresponding EDS analysis results:

(a) $\lambda = 355$ nm, $V = 500$ μm/s; (b) $\lambda = 266$ nm, $V = 500$ μm/s; (c) $\lambda = 355$ nm, $V = 200$ μm/s; (d) $\lambda = 266$ nm, $V = 200$ μm/s. (λ is a wavelength, V is a scanning speed)

воздействии в зависимости от длины волны лазерного воздействия происходит значительное увеличение концентрации кислорода. Если в исходном состоянии на поверхности TiNi зафиксировано небольшое количество кислорода, не превышающее 1 ат. %, то на поверхности образцов TiNi, подвергнутых УФ-лазерному воздействию с длиной волны 355 нм, количество кислорода составляет $5,7 \pm 0,4$ ат. % при скорости сканирования $V = 500$ мкм/с и $9,7 \pm 1,3$ ат. % при скорости сканирования $V = 200$ мкм/с. Для образцов TiNi, подвергнутых УФ-лазерному воздействию с длиной волны 266 нм, наблюдается еще более значительное увеличение количества кислорода по сравнению с исходным состоянием: $7,5 \pm 0,7$ ат. % при скорости сканирования

500 мкм/с и $18,7 \pm 2,1$ ат. % при скорости сканирования 200 мкм/с. Повышение концентрации кислорода на поверхности сплава TiNi после лазерного воздействия может быть вызвано интенсивным взаимодействием Ti с кислородом атмосферы с образованием оксидов титана. Происходящее в процессе лазерной обработки локальное термическое воздействие на поверхность может приводить к образованию таких оксидных фаз, как TiO , TiO_2 , Ti_2O_3 и $\text{Ti}_2\text{Ni}_4\text{O}_x$, которые повышают не только твердость и коррозионную стойкость, но и гидрофильность поверхности и ее биоактивность [17, 23, 24].

На рис. 4 представлены дифрактограммы образцов TiNi после УФ-лазерной обработки со скоростью сканирования 200 мкм/с. На рентге-

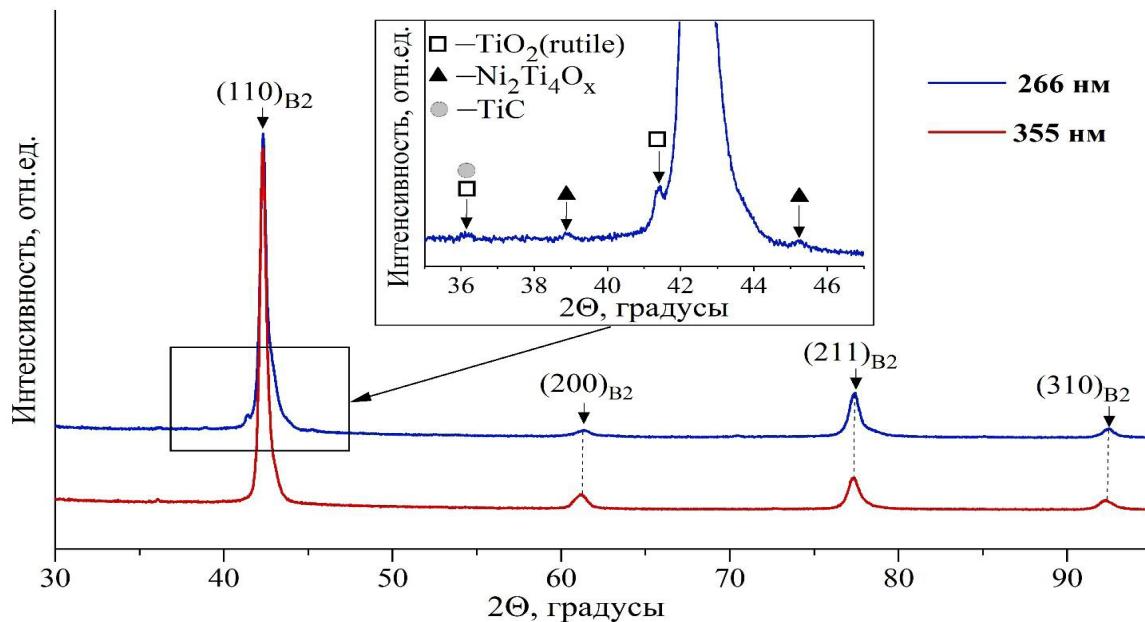


Рис. 4. Рентгенограммы образцов TiNi, подвергнутых УФ-лазерной обработке с длиной волны $\lambda = 266$ нм и $\lambda = 355$ нм и скоростью сканирования $V = 200$ мкм/с

Fig. 4. X-ray diffraction (XRD) patterns obtained from TiNi specimens after UV laser treatment at wavelengths of $\lambda = 266$ nm and $\lambda = 355$ nm, using a scanning speed of 200 $\mu\text{m}/\text{s}$

нограммах после УФ-лазерной обработки с длиной волны 266 нм и скоростью сканирования 200 мкм/с помимо основной B2-фазы TiNi и следов примесной фазы TiC регистрируются пики, соответствующие оксиду титана TiO_2 (рутин) и сложному оксиду $Ni_2Ti_4O_x$. Таким образом, данные рентгеновской дифрактометрии однозначно свидетельствуют об образовании оксидной пленки на поверхности сплава TiNi после обработки УФ-лазерным излучением с длиной волны 266 нм. На рентгенограмме, полученной с поверхности TiNi после воздействия УФ-лазерного излучения с длиной волны 355 нм, даже при самой низкой скорости сканирования 200 мкм/с регистрируются только пики, принадлежащие B2-фазе TiNi и примесной фазе TiC. Отсутствие пиков дифракции от оксидных фаз на рентгенограммах, полученных с поверхности TiNi после облучения с длиной волны 355 нм, может быть связано либо с малой толщиной образовавшейся оксидной пленки, либо с незначительным количеством оксидов (менее 3 %), не превышающим порога чувствительности метода рентгеновской дифракции. Отсутствие дифракционных пиков может быть также связано с вероятной квазиаморфностью оксидных фаз, что не позволяет выявить оксиды на модифицированной УФ-лазерным излучением поверхности

образцов при таких параметрах лазерного воздействия методом рентгенофазового анализа. Значение параметра кристаллической решетки B2-фазы образцов TiNi, подвергнутых УФ-лазерной обработке, уменьшается по сравнению с исходным состоянием до $a = 0,3016 \pm 0,0002$ нм при длине волны $\lambda = 355$ нм ($V = 200$ мкм/с) и до $a = 0,3014 \pm 0,0001$ нм при длине волны $\lambda = 266$ нм. Снижение параметра кристаллической решетки может качественно свидетельствовать об обеднении матрицы B2 TiNi по титану и изменении фазового состава образцов.

Изменения в морфологии, элементном и фазовом составе поверхности сплава TiNi, происходящие при импульсном УФ-лазерном воздействии, влияют на поверхностные свойства сплава, такие как смачиваемость и свободная поверхностная энергия. Смачиваемость поверхности никелида титана (TiNi) играет ключевую роль в биосовместимости материала и влияет на пролиферацию клеток на его поверхности. Как показано в [25], поверхность имплантатов из сплавов TiNi, обладающая умеренной гидрофильностью с краевым углом смачивания воды менее 60° , обеспечивает хорошее смачивание биологическими жидкостями и улучшенную адгезию клеток, что стимулирует пролиферацию эндотелиальных и гладкомышечных клеток.

Повышенная гидрофильность обеспечивает более активную адгезию, уплотнение и размножение клеток, что особенно важно для медицинских имплантатов. Степень гидрофильности, характеризующаяся способностью поверхности материала притягивать и удерживать воду, определяется контактным углом смачивания. Ультрафиолетовое лазерное воздействие на поверхность сплава TiNi вызывает изменение степени гидрофильности. Среднее значение контактного угла смачивания поверхности образцов сплава TiNi в исходном состоянии составляет $75,1 \pm 3,8^\circ$. После ультрафиолетовой лазерной обработки поверхности сплава (TiNi) степень гидрофильности существенно возрастает. Графики зависимостей контактного угла смачивания поверхности титанового сплава TiNi от изменения скорости сканирования при воздействии УФ-лазерного излучения с длиной волны 266 и 355 нм представлены на рис. 5. Характерные фото капель воды на поверхности образцов после лазерного воздействия приведены на вставках рис. 5. Уменьшение длины волны лазерного излучения и понижение скорости сканирования при УФ-лазерном воздействии приводят к уменьшению контактного угла смачивания.

Из представленных на рис. 5 зависимостей следует, что при воздействии на материал УФ-лазерного излучения с длиной волны 355 нм при максимальной скорости сканирования, равной 5000 мкм/с, контактный угол смачивания уменьшается на 10 % по сравнению с исходным состоянием, а при снижении скорости сканирования до 200 мкм/с контактный угол смачивания уменьшается в три раза и составляет $24,7 \pm 1,5^\circ$. Наиболее сильное увеличение степени гидрофильности наблюдается при воздействии на поверхность материала УФ-лазерного излучения с длиной волны 266 нм. Даже при максимальной скорости сканирования (5000 мкм/с) контактный угол смачивания уменьшается более чем в три раза по сравнению с исходным состоянием. Следует отметить, что снижение скорости сканирования с 5000 мкм/с до 200 мкм/с оказывает лишь незначительное влияние на гидрофильность поверхности, при этом контактный угол смачивания варьируется в пределах 11...20°.

Гидрофильность поверхности связана с величиной свободной поверхностной энергии. Повышение свободной поверхностной энергии, достигаемое за счет модификации поверхности методами лазерной обработки или нанесения гидрофильных покрытий,

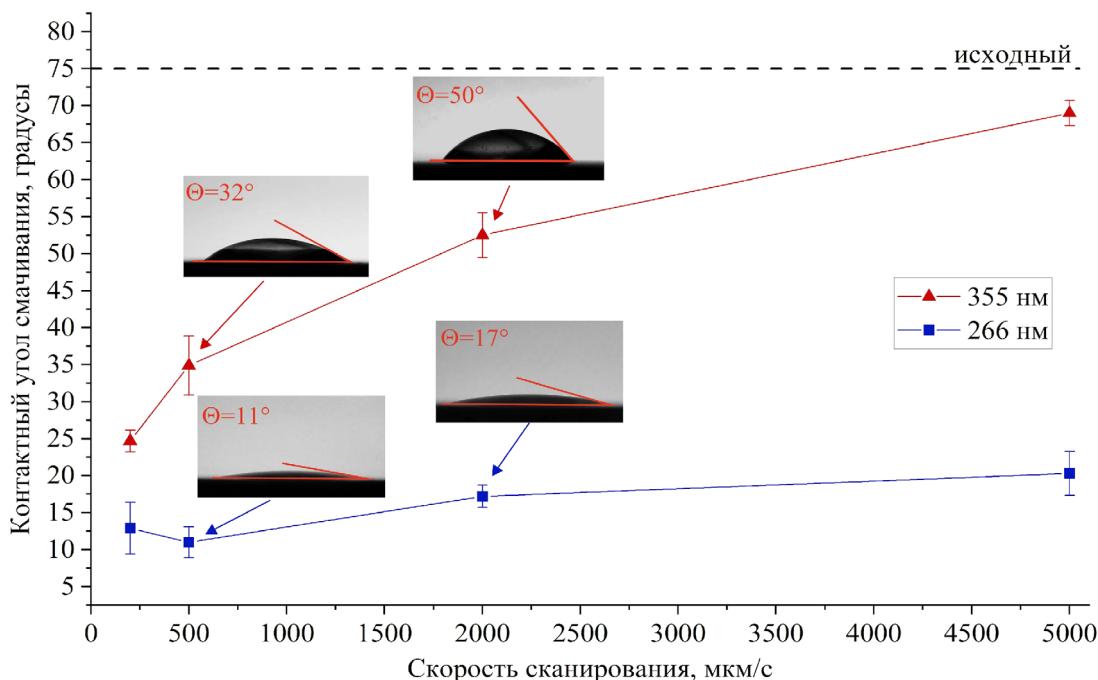


Рис. 5. Влияние длины волны на зависимость контактного угла смачивания от скорости сканирования при УФ-лазерной обработке

Fig. 5. Effect of laser wavelength on the dependence of the water contact angle on the scanning speed during UV laser treatment

приводит к увеличению смачиваемости. Это, в свою очередь, способствует усилению таких функциональных характеристик, как адгезия, биосовместимость и клеточная пролиферация [26, 27]. На рис. 6 представлены зависимости свободной поверхностной энергии и ее составляющих от длины волны УФ-лазерного излучения и скорости сканирования при обработке поверхности образцов TiNi.

После воздействия ультрафиолетового лазерного излучения на поверхность TiNi происходит изменение баланса между дисперсионной γ_d и полярной γ_p составляющими поверхностной энергии. Наблюдается более чем двукратное уменьшение дисперсионной компоненты и значительный рост полярной. При снижении скорости сканирования в процессе УФ-лазерной обработки значение дисперсионной составляющей остается практически неизменным и не превышает 10 мДж/м², в то время как полярная составляющая увеличивается в 5–7 раз. Этот эффект обусловлен главным образом окислением поверхности TiNi, происходящим в процессе лазерной обработки, что приводит к увеличению содержания кислорода и формированию полярных оксидных групп на поверхности, усиливающих полярную составляющую поверхностной энергии и повышающих гидрофильность мате-

риала. Более того, можно предположить, что при УФ-лазерной обработке происходит сдвиг поверхностного электрического потенциала образцов TiNi в положительную область. В результате молекулы поверхностно-активных веществ из окружающей среды адсорбируются на модифицированную поверхность таким образом, что их гидрофильные полярные группы, несущие положительный заряд, ориентируются от поверхности, а углеводородные радикалы, проявляющие гидрофобные свойства, обращены к металлу. Именно эта переориентация адсорбированного слоя может объяснить резкое увеличение полярной составляющей поверхностной энергии [28].

Сравнительный анализ режимов обработки показал различия в воздействии УФ-лазерного излучения с длиной волны 266 и 355 нм на поверхность образцов TiNi. При длине волны 355 нм наблюдается зависимость свободной поверхностной энергии от скорости сканирования: с ее уменьшением значение поверхностной энергии возрастает. При длине волны 266 нм поверхность демонстрирует иное поведение: даже при максимальной скорости сканирования ($V = 5000$ мкм/с) поверхностная энергия увеличивается приблизительно в 2 раза по сравнению с исходным состоянием. При дальнейшем снижении скорости сканирования свободная по-

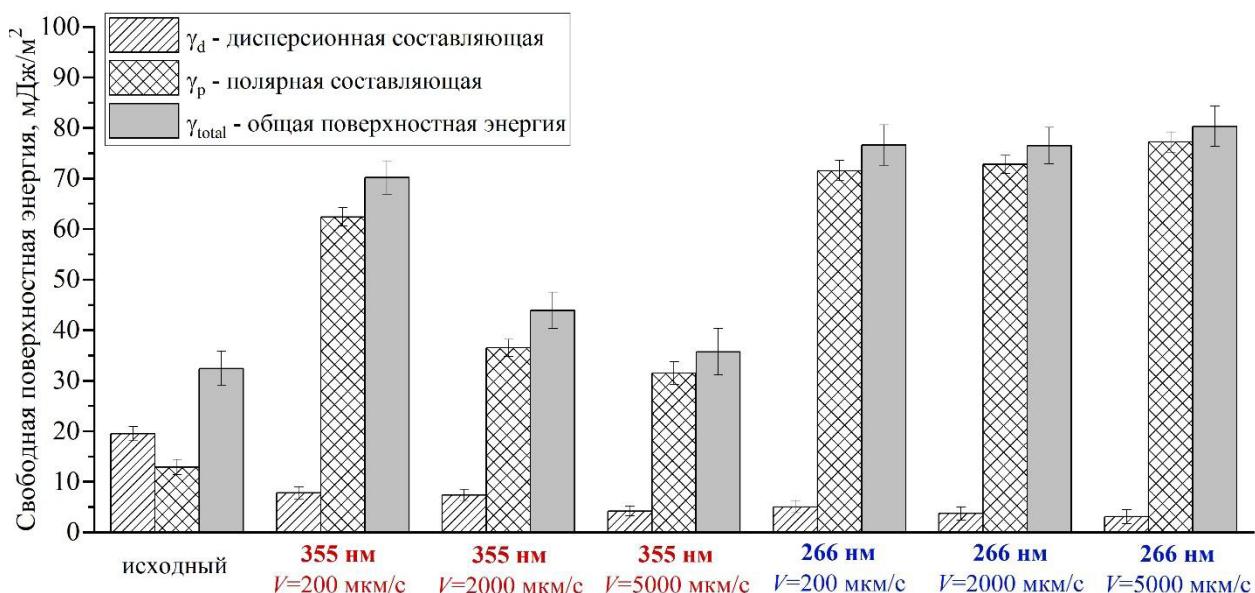


Рис. 6. Свободная поверхностная энергия γ_{total} и ее составляющие (полярная γ_p и дисперсионная γ_d) образцов TiNi до и после УФ-лазерной обработки с разными параметрами

Fig. 6. Surface free energy (γ_{total}) and its components (polar γ_p and dispersive γ_d) of TiNi specimens before and after UV laser treatment with different parameters

верхностная энергия и ее составляющие (γ_d и γ_p) демонстрируют лишь незначительные изменения. Полученные данные коррелируют с результатами измерений контактного угла смачивания (рис. 5).

Различное влияние обработок поверхности образцов TiNi УФ-лазерным излучением с длиной волны 266 и 355 нм на контактный угол смачивания обусловлено разным изменением свободной поверхностной энергии образцов, которая зависит как от микрорельефа, так и от структурно-химических характеристик поверхности, формирующихся после УФ-лазерного воздействия. К числу основных управляемых параметров, определяющих модификацию поверхности при лазерной обработке, относятся длина волны, энергия импульса, частота следования импульсов, длительность импульса, а также пространственный профиль пучка. В нашем случае переменным параметром является длина волны, и наблюдаемая разница в структуре и свойствах поверхности после ее модификации при воздействии УФ-лазерным излучением с длиной волны 266 и 355 нм связана именно с различным влиянием длины волны лазерного излучения.

Различие в характеристиках поверхностей образцов TiNi, модифицированных ультрафиолетовым лазерным излучением с длинами волн 266 и 355 нм, обусловлено прежде всего разной степенью взаимодействия излучения с материалом. В первую очередь это связано с различиями в отражательной способности и коэффициенте поглощения материала на этих длинах волн. УФ-лазерное излучение с длиной волны 266 нм обладает большей энергией фотонов и существенно лучше поглощается в поверхностном слое материала, что ведет к более интенсивному локальному нагреву и окислению поверхности. В свою очередь, УФ-лазерное излучение с длиной волны 355 нм характеризуется меньшей глубиной проникновения, что приводит к другому распределению энергии и формированию микроструктуры поверхности. Экспериментально установленные значения коэффициента отражения, измеренные с помощью измерителя энергии Gentec QE50LP-H-MB-D0, составили ~20 % для длины волны 266 нм и ~30 % для 355 нм. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными для сплава Ti6Al4V [16], где установлено, что отражающая способность сплава возрастает при увеличении длины волны падающего лазерного излучения в диапазоне 266...1064 нм.

Более низкое значение коэффициента отражения при УФ-лазерном излучении с длиной волны 266 нм свидетельствует о существенно большем поглощении энергии в приповерхностном слое, что объясняется более высокой энергией фотонов. В итоге эти различия влияют на изменение морфологии, химического состава, фазового состояния поверхности, а также свободной поверхностной энергии и гидрофильности материала после УФ-лазерной обработки. Таким образом, УФ-лазерное излучение с длиной волны 266 нм характеризуется меньшей глубиной проникновения и более интенсивным воздействием на поверхностные слои, что и обуславливает различия в формирующейся микроструктуре и химическом составе образцов TiNi после УФ-лазерной обработки.

Выходы

1. В работе установлено, что при скоростях сканирования выше 500 мкм/с при воздействии УФ-лазерного излучения с длиной волны 266 и 355 нм на поверхности сплава TiNi сохраняется исходная морфология. Возникновение единичных микротрещин наблюдается на поверхности сплава TiNi, подвергнутой УФ-лазерному излучению со скоростью сканирования $V = 500$ мкм/с только с длиной волны 266 нм. При наименьшей скорости сканирования $V = 200$ мкм/с воздействие УФ-лазерного излучения для обеих длин волн (266 и 355 нм) приводит к образованию на поверхности сплава TiNi локальных структурных повреждений в виде сетки микротрещин. Единичные микротрещины и микрорастрескивание всей поверхности TiNi после УФ-обработки вызваны действием локальных термических напряжений, возникающих в результате резкого нагрева и последующего резкого охлаждения поверхности в процессе УФ-лазерной обработки.

2. Показано, что при УФ-лазерной обработке поверхности сплава TiNi уменьшение длины волны излучения с 355 до 266 нм и уменьшение скорости сканирования с 5000 до 200 мкм/с приводят к увеличению содержания кислорода в поверхностном слое TiNi до ~20 ат. % ($\lambda = 266$ нм, $V = 200$ мкм/с) и ~10 ат. % ($\lambda = 355$ нм, $V = 200$ мкм/с) с образованием оксидов титана.

3. УФ-лазерная обработка приводит к значительному увеличению смачиваемости поверх-

ности TiNi. Наибольшее снижение контактного угла смачивания до $\sim 11^\circ$ было достигнуто при использовании излучения с длиной волны 266 нм, тогда как при обработке лазерным излучением 355 нм угол уменьшается $\sim 25^\circ$ ($V = 200$ мкм/с). Установлено, что наблюдаемое значительное повышение гидрофильности образцов TiNi обусловлено обогащением приповерхностного слоя кислородом, формированием оксидных фаз и, как следствие, значительным увеличением свободной поверхностной энергии за счет резкого роста полярной составляющей.

Таким образом, УФ-лазерная обработка с длиной волны 266 нм вызывает более значительные изменения морфологии и свойств поверхности сплава TiNi по сравнению с излучением 355 нм при одинаковых режимах. Это проявляется в более интенсивном оксидировании поверхности с образованием оксидных фаз, более выраженным развитии микротрещин при малых скоростях сканирования (200 и 500 мкм/с) и существенном повышении гидрофильности. Наблюдаемые эффекты связаны с более высокой энергией фотонов и сниженным коэффициентом отражения поверхности ($\sim 20\%$ для излучения $\lambda = 266$ нм против $\sim 30\%$ для излучения $\lambda = 355$ нм) образцов TiNi, что обеспечивает эффективное поглощение энергии в приповерхностном слое и способствует изменениям в морфологии, рельефе, а также процессам окисления поверхности образцов TiNi.

Список литературы

1. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities / J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson // Materials & Design. – 2014. – Vol. 56. – P. 1078–1113. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
2. Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review / M. Elahinia, N.S. Moghaddam, M.T. Andani, A. Amerinatanzi, B.A. Bimber, R.F. Hamilton // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 83. – P. 630–663. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.001.
3. In vivo biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy: Muscle and perineural tissue responses and capsule membrane thickness / J. Ryhänen, M. Kallioinen, J. Tuukkanen, J. Junila, E. Niemelä, P. Sandvik, W. Serlo // Journal of Biomedical Materials Research. – 1998. – Vol. 41 (3). – P. 481–488. – DOI: 10.1002/(sici)1097-4636(19980905)41:3<481::aid-jbm19>3.0.co;2-l.
4. Liu K., Yao X., Jiang L. Recent developments in bio-inspired special wettability // Chemical Society Reviews. – 2010. – Vol. 39 (8). – P. 3240–3255. – DOI: 10.1039/b917112f.
5. Improvements of anti-corrosion and mechanical properties of NiTi orthopedic materials by acetylene, nitrogen and oxygen plasma immersion ion implantation / R.W.Y. Poon, J.P.Y. Ho, X. Liu, C.Y. Chung, P.K. Chu, K.W.K. Yeung, W.W. Lu, K.M.C. Cheung // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – Vol. 237 (1–2). – P. 411–416. – DOI: 10.1016/j.nimb.2005.05.030.
6. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and electron-beam surface processing on TiNi shape memory alloys: A review // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67 (5). – P. 565–615. – DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5.
7. Microstructural characterization of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by additive pulsed electron-beam melting of film/substrate system / L.L. Meisner, A.B. Markov, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, S.N. Meisner, E.V. Yakovlev, V.O. Semin, Yu.P. Mironov, T.M. Poletika, S.L. Girsova, D.A. Shepel // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 730. – P. 376–385. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.09.238.
8. Surface oxidation of NiTi shape memory alloy / G.S. Firstov, R.G. Vitchev, H. Kumar, B. Blanpain, J. Van Humbeeck // Biomaterials. – 2002. – Vol. 23 (24). – P. 4863–4871. – DOI: 10.1016/S0142-9612(02)00244-2.
9. Phase formation during air annealing of Ti-Ni-Ti laminate / E. Marchenko, Yu. Yasenchuk, G. Baigonakova, S. Gunther, M. Yuzhakov, S. Zenkin, A. Potekaev, K. Dubovikov // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 388. – P. 125543. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125543.
10. Influence of laser surface texturing on the surface morphology and wettability of metals and non-metals: A review / M.A. Khan, A.M. Halil, M.S.Z. Abidin, M.H. Hassan, A.A.A. Rahman // Materials Today Chemistry. – 2024. – Vol. 41. – P. 102316. – DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102316.
11. Surface characterizations of laser modified biomedical grade NiTi shape memory alloys / A. Pequegnat, A. Michael, J. Wang, K. Lian, Y. Zhou, M.I. Khan // Materials Science and Engineering: C. – 2015. – Vol. 50. – P. 367–378. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.01.085.
12. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance / Q. Zhang, J. Dong, M. Peng, Z. Yang, Y. Wan, F. Yao, J. Zhou, C. Ouyang, X. Deng, H. Luo // Materials Science and Engineering: C. – 2020. – Vol. 111. – P. 110847. – DOI: 10.1016/j.msec.2020.110847.

13. Ultrashort laser texturing of superelastic NiTi: Effect of laser power and scanning speed on surface morphology, composition and wettability / C.A. Biffi, J. Fiocchi, M. Rancan, S. Gambaro, F. Cirisano, L. Armelao, A. Tuissi // Metals. – 2023. – Vol. 13 (2). – P. 381. – DOI: 10.3390/met13020381.
14. Chan C.-W., Carson L., Smith G.C. Fibre laser treatment of martensitic NiTi alloys for load-bearing implant applications: Effects of surface chemistry on inhibiting *Staphylococcus aureus* biofilm formation // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 349. – P. 488–502. – DOI: 10.1016/j.surco.2018.06.015.
15. The effect of *fs*-laser micromachining parameters on surface roughness, bio-corrosion and biocompatibility of nitinol / V. Chenrayan, V. Vaishnav, K. Shahapurkar, P. Dhanabal, M. Kalayarasan, S. Raghunath, M. Mano // Optics & Laser Technology. – 2024. – Vol. 170. – P. 110200. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110200.
16. Surface morphology modifications of titanium based implant induced by 40 picosecond laser pulses at 266 nm / D.S. Milovanović, B.B. Radak, B.M. Gaković, D. Batani, M.D. Momčilović, M.S. Trtica // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 501 (1). – P. 89–92. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.04.047.
17. Исследование гидрофильности поверхности металлических материалов, модифицированных ультрафиолетовым лазерным излучением / Т.Ю. Саблина, М.Ю. Панченко, И.А. Зятиков, А.В. Пучикин, И.Н. Коновалов, Ю.Н. Панченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 218–233. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-218-233.
18. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy / Y. Wang, M. Zhang, K. Li, J. Hu // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 139. – P. 106987. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.
19. Biocompatibility of micro/nanostructures nitinol surface via nanosecond laser circularly scanning / S. Li, Z. Cui, W. Zhang, Y. Li, L. Li, D. Gong // Materials Letters. – 2019. – Vol. 255. – P. 126591. – DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126591.
20. Hebbar R.S., Isloor A.M., Ismail A.F. Contact angle measurements // Membrane Characterization / ed. by N. Hilal, A.F. Ismail, T. Matsuura, D. Oatley-Radcliffe. – Elsevier, 2017. – P. 219–255. – DOI: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00012-7.
21. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // Journal of Applied Polymer Science. – 1969. – Vol. 13 (8). – P. 1741–1747. – DOI: 10.1002/app.1969.070130815.
22. Razi S., Mollabashi M., Madanipour K. Laser processing of metallic biomaterials: An approach for surface patterning and wettability control // The European Physical Journal Plus. – 2015. – Vol. 130. – P. 247. – DOI: 10.1140/epjp/i2015-15247-5.
23. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review / J. Min, H. Wan, B.E. Carlson, J. Lin, C. Sun // Optics & Laser Technology. – 2020. – Vol. 128. – P. 106188. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188.
24. Repetitive nanosecond laser-induced oxidation and phase transformation in NiTi alloy / H. Choi, M. Na, I. Jun, M.-H. Lee, H.-D. Jung, H. Lee, J. Han, K. Lee, C.-H. Park, H.-E. Kim, J. Song, Y.-H. Koh, S. Kim // Metals and Materials International. – 2024. – Vol. 30. – P. 1200–1208. – DOI: 10.1007/s12540-023-01581-w.
25. The influence of surface treatment on wettability of TiNi-based alloy / Yu.F. Yasenchuk, S.V. Gunther, O.V. Kokorev, E.S. Marchenko, V. Gunther, G.A. Bagonakova, K.M. Dubovikov // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62 (2). – P. 333–338. – DOI: 10.1007/s11182-019-01716-w.
26. Surface free energy dominates the biological interactions of postprocessed additively manufactured Ti-6Al-4V / V.M. Villapun Puzas, L.N. Carter, C. Schröder, P.E. Colavita, D.A. Hoey, M.A. Webber, O. Addison, D.E.T. Shepherd, M.M. Attallah, L.M. Grover, S.C. Cox // ACS Biomaterials Science & Engineering. – 2022. – Vol. 8 (10). – P. 4311–4326. – DOI: 10.1021/acsbiomaterials.2c00298.
27. Laser-assisted tailoring of surface wettability – Fundamentals and applications: A critical review / A. Peethan, V.K. Unnikrishnan, S. Chidangil, S.D. George // Progress in Adhesion and Adhesives. Vol. 5: Surface modification of polymers: methods and applications / ed. by K.L. Mittal, S.D. George. – Scrivener Publishing LLC, 2020. – P. 331–265. – ISBN 9781119748069. – DOI: 10.1002/9781119749882.ch11.
28. Изменение смачиваемости поверхности нержавеющей стали на основе лазерного текстурирования рельефа / А.В. Рыженков, А.В. Волков, Е.С. Трушин, С.П. Черепанов // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 136–146. – DOI: 10.18721/JEST.28409.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of laser radiation wavelength on the structure and functional properties of TiNi alloy during UV laser treatment

Tatyana Sablina ^{a,*}, Marina Kandaurova ^b, Ilya Zyatikov ^c, Yurii Panchenko ^d

Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademichesky Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5941-5732>, sabltat@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-0236-2227>, panchenko.marina4@gmail.com;
^c <https://orcid.org/0000-0003-3219-9299>, zyatikov@lgl.hcei.tsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-8017-7268>, yu.n.panchenko@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 October 2025

Revised: 17 October 2025

Accepted: 31 October 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Ultraviolet laser radiation

Radiation wavelength

Surface modification

Laser treatment

Wettability

TiNi alloy

Funding

This research was carried out with support from the Russian Science Foundation grant No. 25-79-31008, <https://rscf.ru/project/25-79-31008/>.

ABSTRACT

Introduction. The widespread use of *TiNi*-based functional alloys in medicine requires targeted management of their surface properties, such as wettability and biocompatibility. One of the promising methods for surface modification is laser treatment, especially in the *UV* range of the spectrum. The efficiency of *UV* laser treatment is due to the high photon energy, strong absorption by metals, and the shallow depth of the thermal effect zone. **The purpose of this work** is to investigate the effect of *UV* laser radiation wavelength (266 and 355 nm) on the structural and phase state, chemical composition, and wettability of the *TiNi* alloy surface, with the goal of subsequently controlling the material's functional properties. **Materials and research methods.** *TiNi* surface modification was performed using a pulsed *Nd:YAG* laser operating at wavelengths of 266 and 355 nm in ambient air. The modified surfaces were analyzed by scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (*SEM-EDS*). Microstructure, elemental composition, and phase composition were analyzed by X-ray diffraction (*XRD*). Wettability was estimated using the sessile drop method. The free surface energy, along with its dispersive and polar components, was then calculated from the contact angle data using the *OWRK* method. **Results and discussion.** *UV* laser treatment, varying parameters such as laser radiation wavelength and scanning speed, was found to induce changes in the morphology, elemental composition, phase composition of the surface layer of *TiNi* alloy samples, and their surface properties. Following *UV* laser treatment at wavelengths of 266 and 355 nm and low scanning speeds ($V = 200$ and $500 \mu\text{m/s}$), single microcracks or microcrack networks resulting from thermal exposure were observed on the specimen surfaces. The oxygen content on the *TiNi* surface increased by a factor of 5 to 18 compared to the initial state after *UV* laser treatment. Furthermore, the phase composition of the *TiNi* alloy underwent noticeable changes, with titanium oxide phases being detected on the surface after laser exposure. The higher-energy photons ($\lambda = 266 \text{ nm}$) resulted in a more pronounced change in the surface morphology and properties of *TiNi* compared to the 355 nm radiation under identical treating conditions. *UV* laser treatment significantly increased the surface hydrophilicity: the contact angle decreased from $\approx 75^\circ$ in the initial state to $\approx 25^\circ$ and $\approx 11^\circ$ after treatment with 355 and 266 nm radiation wavelength, respectively. Additionally, an increase in the free surface energy of the *TiNi* specimens was observed, primarily due to a significant increase in the polar component.

For citation: Sablina T.Y., Kandaurova M.Yu., Zyatikov I.A., Panchenko Yu.N. Effect of laser radiation wavelength on the structure and functional properties of TiNi alloy during UV laser treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 257–271. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-257-271. (In Russian).

References

1. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
2. Elahinia M., Moghaddam N.S., Andani M.T., Amerinatanzi A., Bimber B.A., Hamilton R.F. Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review. *Progress in Materials Science*, 2016, vol. 83, pp. 630–663. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.001.

* Corresponding author

Sablina Tatyana Yu., Ph.D. (Engineering), Scientific associate
 Institute of High Current Electronics
 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
 2/3 Akademichesky Avenue,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 913 843-21-78, e-mail: sabltat@mail.ru

3. Ryhänen J., Kallioinen M., Tuukkanen J., Junila J., Niemelä E., Sandvik P., Serlo W. In vivo biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy: Muscle and perineural tissue responses and encapsule membrane thickness. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1998, vol. 41 (3), pp. 481–488. DOI: 10.1002/(sici)1097-4636(19980905)41:3<481::aid-jbm19>3.0.co;2-1.
4. Liu K., Yao X., Jiang L. Recent developments in bio-inspired special wettability. *Chemical Society Reviews*, 2010, vol. 39 (8), pp. 3240–3255. DOI: 10.1039/b917112f.
5. Poon R.W.Y., Ho J.P.Y., Liu X., Chung C.Y., Chu P.K., Yeung K.W.K., Lu W.W., Cheung K.M.C. Improvements of anti-corrosion and mechanical properties of NiTi orthopedic materials by acetylene, nitrogen and oxygen plasma immersion ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005, vol. 237 (1–2), pp. 411–416. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.05.030.
6. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and electron-beam surface processing on TiNi shape memory alloys: a review. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67 (5), pp. 565–615. DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5.
7. Meisner L.L., Markov A.B., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Mironov Yu.P., Poletika T.M., Girsova S.L., Shepel D.A. Microstructural characterization of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by additive pulsed electron-beam melting of film/substrate system. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 730, pp. 376–385. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.09.238.
8. Firstov G.S., Vitchev R.G., Kumar H., Blanpain B., Van Humbeeck J. Surface oxidation of NiTi shape memory alloy. *Biomaterials*, 2002, vol. 23 (24), pp. 4863–4871. DOI: 10.1016/S0142-9612(02)00244-2.
9. Marchenko E., Yasenchuk Yu., Baigonakova G., Gunther S., Yuzhakov M., Zenkin S., Potekaev A., Dubovikov K. Phase formation during air annealing of Ti-Ni-Ti laminate. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 388, p. 125543. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125543.
10. Khan M.A., Halil A.M., Abidin M.S.Z., Hassan M.H., Rahman A.A.A. Influence of laser surface texturing on the surface morphology and wettability of metals and non-metals: A review. *Materials Today Chemistry*, 2024, vol. 41, p. 102316. DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102316.
11. Pequegnat A., Michael A., Wang J., Lian K., Zhou Y., Khan M.I. Surface characterizations of laser modified biomedical grade NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, vol. 50, pp. 367–378. DOI: 10.1016/j.msec.2015.01.085.
12. Zhang Q., Dong J., Peng M., Yang Z., Wan Y., Yao F., Zhou J., Ouyang C., Deng X., Luo H. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance. *Materials Science and Engineering: C*, 2020, vol. 111, p. 110847. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110847.
13. Biffi C.A., Fiocchi J., Rancan M., Gambaro S., Cirisano F., Armelao L., Tuissi A. Ultrashort laser texturing of superelastic NiTi: Effect of laser power and scanning speed on surface morphology, composition and wettability. *Metals*, 2023, vol. 13 (2), p. 381. DOI: 10.3390/met13020381.
14. Chan C.-W., Carson L., Smith G.C. Fibre laser treatment of martensitic NiTi alloys for load-bearing implant applications: Effects of surface chemistry on inhibiting *Staphylococcus aureus* biofilm formation. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 349, pp. 488–502. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.015.
15. Chenrayan V., Vaishnav V., Shahapurkar K., Dhanabal P., Kalayarasan M., Raghunath S., Mano M. The effect of fs-laser micromachining parameters on surface roughness, bio-corrosion and biocompatibility of nitinol. *Optics & Laser Technology*, 2024, vol. 170, p. 110200. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110200.
16. Milovanović D.S., Radak B.B., Gaković B.M., Batani D., Momčilović M.D., Trtica M.S. Surface morphology modifications of titanium based implant induced by 40 picosecond laser pulses at 266 nm. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 501 (1), pp. 89–92. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.04.047.
17. Sablina T.Y., Panchenko M.Yu., Zyatikov I.A., Puchikin A.V., Konovalov I.N., Panchenko Yu.N. Study of surface hydrophilicity of metallic materials modified by ultraviolet laser radiation. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 218–233. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-218-233. (In Russian).
18. Wang Y., Zhang M., Li K., Hu J. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 139, p. 106987. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.
19. Li S., Cui Z., Zhang W., Li Y., Li L., Gong D. Biocompatibility of micro/nanostructures nitinol surface via nanosecond laser circularly scanning. *Materials Letters*, 2019, vol. 255, p. 126591. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126591.
20. Hebbar R.S., Isloor A.M., Ismail A.F. Contact angle measurements. *Membrane Characterization*. Ed. by N. Hilal, A.F. Ismail, T. Matsuura, D. Oatley-Radcliffe. Elsevier, 2017, pp. 219–255. DOI: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00012-7.
21. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1969, vol. 13 (8), pp. 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815.

22. Razi S., Mollabashi M., Madanipour K. Laser processing of metallic biomaterials: An approach for surface patterning and wettability control. *The European Physical Journal Plus*, 2015, vol. 130, p. 247. DOI: 10.1140/epjp/i2015-15247-5.
23. Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J., Sun C. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 128, p. 106188. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188.
24. Choi H., Na M., Jun I., Lee M.-H., Jung H.-D., Lee H., Han J., Lee K., Park C.-H., Kim H.-E., Song J., Koh Y.-H., Kim S. Repetitive nanosecond laser-induced oxidation and phase transformation in NiTi alloy. *Metals and Materials International*, 2024, vol. 30, pp. 1200–1208. DOI: 10.1007/s12540-023-01581-w.
25. Yasenchuk Yu.F., Gunther S.V., Kokorev O.V., Marchenko E.S., Gunther V., Baigonakova G.A., Dubovikov K.M. The influence of surface treatment on wettability of TiNi-based alloy. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62 (2), pp. 333–338. DOI: 10.1007/s11182-019-01716-w.
26. Villapun Puzas V.M., Carter L.N., Schröder C., Colavita P.E., Hoey D.A., Webber M.A., Addison O., Shepherd D.E.T., Attallah M.M., Grover L.M., Cox S.C. Surface free energy dominates the biological interactions of postprocessed additively manufactured Ti-6Al-4V. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2022, vol. 8 (10), pp. 4311–4326. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.2c00298.
27. Peethan A., Unnikrishnan V.K., Chidangil S., George S.D. Laser-assisted tailoring of surface wettability – Fundamentals and applications: A critical review. *Progress in Adhesion and Adhesives*. Vol. 5. *Surface modification of polymers: methods and applications*. Ed. by K.L. Mittal, S.D. George. Scrivener Publishing LLC, 2020, pp. 331–265. ISBN 9781119748069. DOI: 10.1002/9781119749882.ch11.
28. Ryzhenkov A.V., Volkov A.V., Trushin E.S., Cherepanov S.P. Change of wettability of stainless steel surface based on laser texturing of relief. *Global'naya energiya = Global Energy*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 136–146. DOI: 10.18721/JEST.28409. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).