

УДК 544.032.65

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

© 2020 г. Д. А. Кочуев¹, *, Р. В. Чкалов¹, В. Г. Прокошев¹, К. С. Хорьков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”,
Владимир, Россия

*E-mail: _b_@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Работа посвящена проблеме микро- и наноструктурирования поверхности твердых тел в результате воздействия лазерного излучения. Представлен метод формирования периодических поверхностных структур посредством фемтосекундной лазерной обработки на примере решения задач структурирования молибдена и синтеза покрытий карбида титана.

DOI: 10.31857/S0367676520030151

ВВЕДЕНИЕ

Образование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) является уникальным явлением, которое можно наблюдать практически на любом материале после облучения линейно поляризованными лазерным излучением, особенно фемтосекундной длительности. Подобная технология обработки обеспечивает простой метод наноструктурирования и функционализации поверхностей материалов для управления их оптическими, механическими или химическими свойствами [1]. Так, образование периодических структур, формируемых в результате воздействия фемтосекундного излучения на поверхности металлов, приводит к снижению коэффициента трения и замедлению износа изделий, что обусловлено влиянием микроструктуры поверхности, а именно степени ее шероховатости или пористости, на фрикционные свойства материала. Проявление значительных антифрикционных качеств, приобретаемых обрабатываемой поверхностью в результате структурирования лазерным излучением, обеспечивает огромный потенциал ЛИППС-технологии в трибологических применениях. Отличительной особенностью данного метода лазерной обработки является возможность работы даже с тугоплавкими металлами, обладающими высокими эксплуатационными характеристиками, наиболее широко используемыми из которых являются молибден и титан. Ввиду вышесказанного актуальной задачей является исследование и подбор оптимальных параметров и условий структурирования поверхностей пред-

ставленных металлов с целью формирования упорядоченного рельефа ЛИППС и достижения значительного улучшения рабочих характеристик материалов [2].

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МОЛИБДЕНА

В качестве источника излучения была использована фемтосекундная лазерная система со следующими характеристиками: центральная длина волны $\lambda = 1029$ нм; длительность импульса $\tau = 300$ фс; частота повторения импульсов $f = 10$ кГц; энергия в импульсе $\epsilon = 150$ мкДж. Для ускорения процесса сканирования поверхности экспериментальная схема была дополнена цилиндрической линзой, что позволило сфокусировать излучение в форме линии. Размер пучка в области обработки составил порядка 100 мкм по направлению сканирования и около 4 мм в поперечной плоскости, поляризация лазерного излучения линейная. Подобный подход позволяет добиться существенного снижения времени обработки путем увеличения облучаемой площади, охватываемой за отдельный проход. Образцом выступала круглая пластинка молибдена. Перед микрообработкой пластина была отполирована на полировальном диске и обезжирена. Подготовленный к эксперименту образец помещали на трехкоординатную позиционную платформу облучали лазером, в результате чего на поверхности молибдена были сформированы ППС.

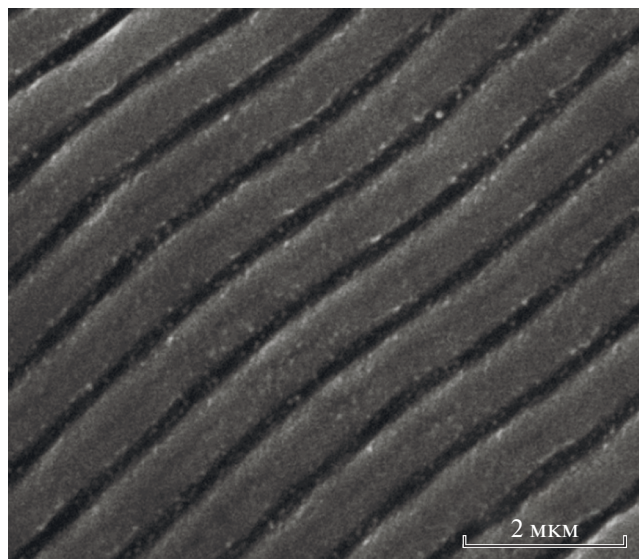


Рис. 1. РЭМ-Изображение структур, полученных на поверхности молибдена в результате обработки фемтосекундным ЛИ.

Исследования периодических поверхностных структур, сформированных вследствие воздействия фемтосекундного лазерного излучения, производили на основе изображений, полученных с растрового электронного микроскопа. Анализ показал, что наиболее оптимальное значение средней мощности для формирования поверхностных структур — 1.5 Вт, поскольку при меньшей мощности, при использовании астигматического пучка данного размера, периодические поверхностные структуры формируются недостаточно явно.

Далее исследовали зависимость образованных рипл-структур от скорости перемещения образца. В виду импульсного характера воздействия лазерного излучения была выполнена оценка влияния степени перекрытия областей на характер изменения морфологии поверхности [3]. В процессе проведения эксперимента значение мощности лазерного излучения было неизменно. Всего было записано 10 участков со значениями скорости 0.5–5 мм/с, протяженность записываемых треков составляла 20 мм. Обрабатываемую поверхность располагали в фокальной плоскости фокусирующей системы.

Анализ изображений, полученных на растровом электроном микроскопе, показал зависимость изменения характера образования структур от скорости сканирования. Было установлено, что приемлемое значение скорости сканирования составило 1 мм/с (рис. 1). Критерием определения наилучшего режима обработки было получение четко сформированных периодических структур, без каких-либо выраженных дефектов в виде откольной абляции расплава или фазового взрыва [4]. При обра-

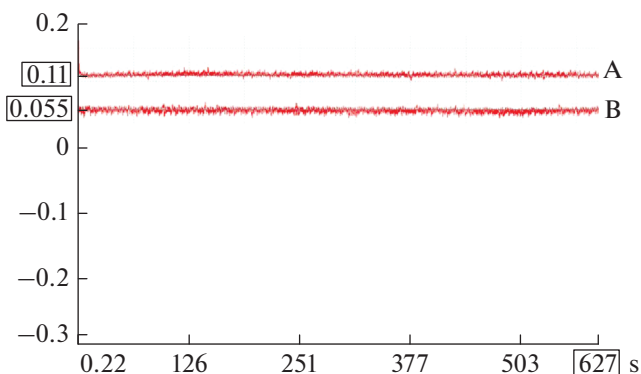


Рис. 2. График определения коэффициента трения поверхности молибдена: А — исходное значение, В — значение после воздействия лазерного излучения.

ботке с меньшей скоростью периодические структуры, образующиеся на поверхности, начинают плавиться, в противном случае периодические структуры не успевают сформироваться.

Измерение шероховатости проводили как на образованной в результате лазерной обработки поверхности, так и на исходной (до образования ЛИППС). Шероховатость поверхности образцов измеряли с помощью профилометра с алмазным наконечником (измерительное усилие 0.75 мН, область измерения 0.8 мкм). Шероховатость до обработки составила 0.04 мкм, шероховатость ЛИПП-структур — 0.08 мкм.

Исследование коэффициента трения поверхности молибдена до и после обработки проводили посредством трибометра. Усилие, с которым контртело действовало на образец, равнялось 10 Н. Между контртелом и образцом находился слой смазки — индустриального масла. После обработки молибдена лазерным излучением, коэффициент трения контртела о поверхность исследуемого образца снизился в 2 раза (рис. 2). Значительное снижение коэффициента трения достигается вследствие формирования поверхностных структур, обладающих развитым рельефом. Образующиеся чередующиеся канавки способствуют лучшему удержанию смазки, чем необработанная поверхность, что в свою очередь обеспечивает низкое трение [5]. Развитый микрорельеф поверхности, помимо функций удержания смазки, способствует снижению контактной площади сопряженных пар трения за счет увеличения шероховатости поверхности [6].

СИНТЕЗ ЛИПП-СТРУКТУР КАРБИДА ТИТАНА

В качестве реакционного вещества, являющегося источником углерода, был использован предельный углеводород — гексан в силу особенно-

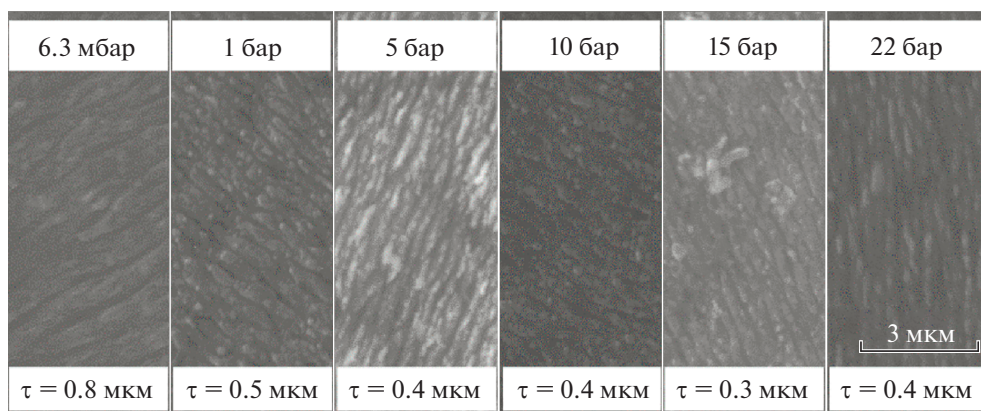


Рис. 3. Результат обработки поверхности титанового образца при различных значениях давления газа, где τ – период ЛИПП-структур.

стей молекулярного строения и оптимальных спектральных характеристик этого вещества. Молекула гексана C_6H_{14} представляет из себя группу из атомов углерода, связанных между собой в цепочку, а также атомов водорода, и имеет 5 изомеров с той же химической формулой, но другой пространственной конструкцией молекулы. Цепочка н-гексана имеет наименее прочные углерод-углеродные и углерод-водородные связи и мало склонна к образованию стойкого углеродного кольца (как ксилол). При обработке титана фемтосекундным лазерным излучением в среде гексана на поверхности титана происходит образование карбида титана высокой фазовой частоты [7].

Толщина жидкого слоя на поверхности обрабатываемого образца оказывает влияние на ряд параметров, таких как скорость разлета продуктов абляции, интенсивность охлаждения образованных частиц, вывод частиц из области воздействия, распределение энергии лазерного излучения на непосредственной поверхности обрабатываемого образца. При большой толщине слоя жидкости (порядка нескольких мм) происходит значительное ухудшение параметров лазерного пучка. Эффективной передачи энергии лазерного излучения не происходит, в том числе в виду взаимодействия лазерного излучения непосредственно с жидкой средой, поскольку после воздействия лазерного излучения происходит образование парогазового канала и интенсивное кипение жидкости [8]. Образовавшиеся гидродинамические течения в области воздействия лазерного излучения обладают большей инерционностью в сравнении с частотой следования лазерных импульсов что негативно сказывается на эффективности энергообмена системы “лазерное излучение – обрабатываемая поверхность”. Дополнительным негативным фактором, существенно ухудшающим характеристики лазерного пучка, является наличие газовых пузырьков в жидкости.

Для обработки поверхности титановых образцов использовали следующую схему эксперимента: образец устанавливали на предметный столик, помещенный в сосуд, сосуд герметизировали, откачивали и заполняли высокочистым аргоном (цикл повторяли 5 раз). Далее сосуд заполняли н-гексаном до требуемого уровня (1 мм над поверхностью образца) и устанавливали необходимое давление. После этого сканировали образец лазерным пучком (параметры лазерного излучения соответствуют значениям предыдущего эксперимента).

В качестве изменяемой величины выступало давление буферного газа в сосуде в диапазоне от 0.0063 до 22 бар. Нижняя граница обусловлена физическими свойствами н-гексана, которые приводят к интенсивному закипанию жидкости, верхняя граница в 22 бара была задана техническими характеристиками используемой газовой арматуры.

На рис. 3 представлены результаты обработки поверхности титанового образца фемтосекундным лазерным излучением в соответствии с заданными условиями. Как видно из иллюстрации последовательное увеличение давления буферного газа приводит к возникновению ряда закономерностей. В явном виде прослеживается тенденция к снижению периода ЛИППС, зависимости рельефа от режима обработки. Интенсивность кипения н-гексана несколько уменьшается, изменение цвета жидкой среды становится менее выраженным, снижается динамика абляции поверхности титана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Варьирование условий проведения ЛИППС-обработки, в частности давления внешней среды на образец, приводит к значительному изменению картины рельефа структурируемой поверхности. Таким образом, подбор оптимального ре-

жима обработки позволяет добиться достижения уникальных параметров наноструктурирования, что влечет за собой изменение эксплуатационных свойств материала изделия. Рассмотренный метод формирования периодических поверхностных структур может быть использован в промышленности при обработке пар трения для повышения антифрикционных свойств, а также формирования защитных карбидных покрытий на поверхности тугоплавких металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sabri A., Fotis F., Kunze T. et al.* // *Materials*. 2019. V. 12. № 7. P. 1018.
2. *Voznesenskaya A.A., Kochuev, D.A., Zhdanov A.V. et al.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1164. Art. № 012002.
3. *Kononov D.M., Voznesenskaya A.A., Morozov V.V.* // *Mater. Today. Proc.* 2019. V. 11. P. 481.
4. *Yang G.W.* // *Prog. Mater. Sci.* 2007. V. 52. № 4. P. 648.
5. *Ivashchenko A.V., Voznesenskaya A.A., Davydov N.N. et al.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. V. 1109. Art. № 012035.
6. *Abramov D.V., Arakelyan D.M., Makov S.A. et al.* // *Tech. Phys. Lett.* 2013. V. 39. № 8. P. 719.
7. *Ivashchenko A.V., Kochuev D.A., Khorkov K.S. et al.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1238. Art. № 012033.
8. *Kochuev D.A., Khorkov K.S., Abramov D.V. et al.* // *J. Surf. Invest. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* V. 12. № 6. P. 1220.