

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что осаждение легкоплавких металлов и их сплавов в ПК с использованием ультразвуковой обработки позволяет добиться полного заполнения каналов его пор. Наибольшая концентрация металла наблюдается в верхней части канала и постепенно снижается по мере углубления в пору.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. E. Chubenko. Porous Silicon as Host and Template Material for Fabricating Composites and Hybrid Materials. In: Porous Silicon: Opto- and Microelectronic Applications. / Ed. by G. Korotcenkov. – Taylor and Francis Group. N.W., 2015. P. 182–200.
2. Nanoporous silicon fabricated at different illumination and electrochemical conditions / J. akubowicz // Superlattice. Microst. – 2007. – V. 41, № 4. – P. 205–215.
3. Fundamentals of Porous Silicon Preparation / M.J. Sailor. – New York : Wiley, 2012.
4. Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties, Volume 1 / G. Korotcenkov. – New York: CRC Press; 2016.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ-ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Г. А. Гусаков, Г. В. Шаронов

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета
(НИИППФ им. А.Н.Севченко БГУ), ул. Курчатова, 7, г. Минск, Беларусь, e-mail: gga68@rambler.ru*

Рассмотрены основные факторы, влияющие на качество обработки поверхности алюминиевых сплавов при наноразмерной алмазной лезвийной обработке. Определены пути повышения оптического качества и лучевой прочности зеркал-отражателей для транспортировки мощных лазерных энергетических потоков. Показано, что предварительная термообработка заготовок из сплава АМг2 при $T = 540^\circ\text{C}$ позволяет улучшить качество обработки поверхности и лучевую прочность алюминиевых зеркал как за счет снятия механических напряжений, так и за счет частичной гомогенизации исходного материала.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; алмазное наноточение; зеркала-отражатели; лучевая прочность.

IMPROVING THE SURFACE QUALITY OF METAL REFLECTORS MIRRORS FOR TRANSPORTATION OF HIGH-POWER LASER ENERGY FLOWS

G. A. Gusakov, G. V. Sharonov

*Research Institute of Applied Physical Problems named after A.N. Sevchenko
of the Belarusian State University, Kurchatov st., 7, Minsk, Belarus
Corresponding author: G. A. Gusakov (gga68@rambler.ru)*

The main factors affecting the quality of surface treatment of aluminum alloys during nanoscale single point diamond turning are considered. The ways of improving the optical quality and radiation strength of reflector mirrors for the transportation of high-power laser energy flows are determined. It was shown that preliminary heat treatment of AMg2 alloy substrates at $T = 540^{\circ}\text{C}$ allows improving the quality of surface treatment and the laser damage threshold of aluminum mirrors both by relieving mechanical stresses and by partially homogenizing the substrate material.

Key words: aluminum alloys; single point diamond turning; reflecting mirrors; laser damage threshold.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технология алмазного лезвийного точения с наноразмерной шероховатостью широко используется при изготовлении металлооптических изделий, в первую очередь, зеркал-отражателей для транспортировки мощных лазерных энергетических потоков [1–3]. К металлам при изготовлении зеркал-отражателей с высокой лучевой прочностью предъявляются жесткие требования: минимальные значения физической, химической и индуцированной неоднородности; отсутствие внутренних напряжений; хорошая полируемость; высокая отражательная способность; высокая теплопроводность и минимальный коэффициент линейного расширения. Благодаря хорошей обрабатываемости, для изготовления зеркал-отражателей часто используются алюминиевые сплавы типа АМг2 и АМг6. Эти сплавы являются предпочтительным материалом для зеркал в авиационно-космической технике [2, 3].

При изготовлении металлооптических изделий основное внимание, как правило, уделяется вопросам обеспечения точности формы и снижению шероховатости поверхности [2–5]. Вместе с тем, неоднородности структуры поверхности и остаточные внутренние напряжения, присущие алюминиевым сплавам [3, 5], могут существенно сказаться на оптических и эксплуатационных характеристиках зеркал-отражателей особенно в случае воздействия лазерного излучения высокой мощности. Однако, эти проблемы освещены в значительно меньшей степени.

Целью настоящей работы является исследование влияния неоднородностей структуры поверхности подложек из алюминиевого сплава АМг2 на их оптическое и механические характеристики и определение путей повышения качества алюминиевых зеркал-отражателей, изготавливаемых с использованием наноразмерной алмазной лезвийной обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Зеркала-отражатели диаметром 100 мм и толщиной 8 мм изготавливались из алюминиевого сплава АМг2. Предварительная механическая обработка поверхности осуществлялась твердосплавным резцом. С целью снятия остаточных механических напряжений и гомогенизации поверхности подложек производилась их термическая обработка на воздухе в интервале температур от 200 до 540 °С. Длительность отжига составляла 10 часов с последующим остыванием в печи. Финишная оптическая обработка поверхности производилась на прецизионном токарном станке модели МК 6501 со шпинделем на воздушном подшипнике с использованием специального алмазного резца с радиусом закругления лезвия $\leq 0,05$ мкм.

Анализ состава поверхности исходных заготовок из сплава АМг2 и заготовок, подвергнутых механо-термической обработке, проводился методами растровой элек-

тронной микроскопии (РЭМ)/электронного микрозонда с использование электронного микроскопа LEO 1455 VP (Carl Zeiss, Германия). Контроль качества обработки поверхности осуществлялся методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем микроскопе «Solver P47 Pro» (НТ-МДТ, Россия). Контроль отражательной способности зеркал в спектральном диапазоне 200...2500 нм осуществлялся на спектрометре Lambda1050 (PerkinElmer, США). Исследование лучевой прочности проводилось с использованием импульсного излучения ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau = 20$ нс) YAG:Nd³⁺ лазера модели LS-2137 (Lotis-ТII, Беларусь). Энергия лазерного импульса регистрировалась с помощью измерителя энергии ИМО-3 («Эталон», Россия). Для контроля пространственного распределения энергии в лазерном пятне использовался CCD датчик изображения ICX415AL фирмы Sony. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности образца варьировалась в диапазоне от 0,5 до 15 Дж/см².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным электронного микрозонда для исходного сплава характерно наличие интерметаллидных включений, размер которых достигает 10 мкм (рисунок, обр. №1). Первый тип включений (светлые области на рисунке) имеет состав Al_{4,5}FeMn_{0,2}. Второй тип (темные области) имеет состав Al₃MgSi. Твердость этих включений существенно отличается от твердости алюминиевой матрицы, что отрицательно сказывается на чистоте обработки поверхности. Кроме того, наличие на поверхности зеркал интерметаллидных включений может снизить их лучевую прочность. Отсюда следует необходимость проведения предварительного гомогенизирующего отжига заготовок.

Влияние предварительной термообработки на размеры и состав интерметаллидных включений в сплаве АМг2 показано на рисунке.

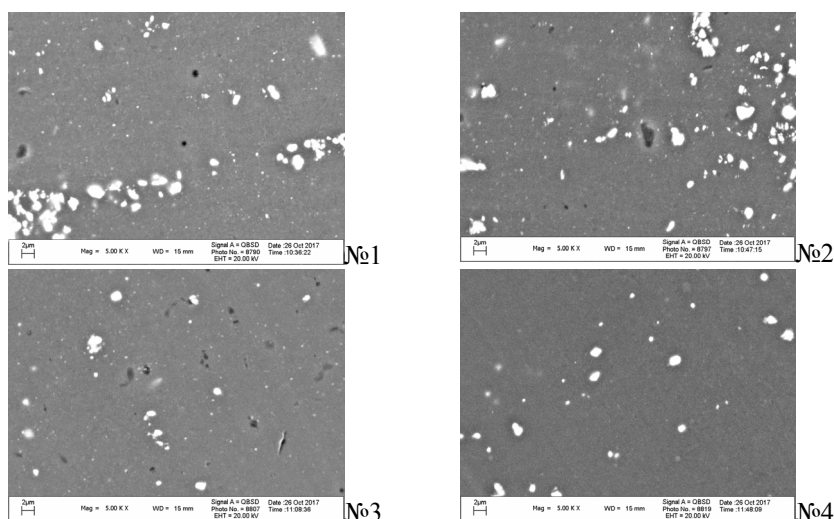


Рисунок – Микрофотографии поверхности образцов из алюминиевого сплава сплава АМг2. №1 – исходный образец, №2–4 – образцы после термообработок при $T = 200, 380$ и 540 °С, соответственно

Видно, что отжиг при $T = 200$ °С не влияет на размеры и состав интерметаллидных включений (рис., образец №2). При $T = 380$ °С начинается уменьшение размеров включений с повышенным содержанием магния. Для включений с повышенным со-

держанием железа изменений не наблюдается (рис., образец № 3). В результате отжига при $T = 540^\circ\text{C}$ происходит полное исчезновение включений с повышенным содержанием магния. Включения с повышенным содержанием железа сохраняются, хотя и несколько уменьшаются в размерах (рис., образец № 4)

После гомогенизирующего отжига все образцы подложек прошли суперфинишную лезвийную алмазную обработку для получения оптической чистоты поверхности. Для изготовленных зеркал-отражателей проведены исследования шероховатости поверхности методом АСМ. Результаты измерений приведены в таблице. Хорошо видно, что гомогенизирующий отжиг, в целом, оказывает положительное влияние на чистоту обработки поверхности сплава АМг2 алмазным резцом. Так для исходного образца №1, не подвергавшегося отжигу, после финишной обработки измеренное значение параметра шероховатости поверхности R_a составляет 1,5 нм. Для образца, отожженного при $T = 200^\circ\text{C}$, $R_a = 1,1$ нм. Для образцов № 3 и № 4, отожженных при $T \geq 380^\circ\text{C}$, регистрируется шероховатость поверхности R_a менее 1 нм.

Таблица

Значения шероховатости поверхности зеркал в зависимости от режимов термообработки

№ п/п	R_a , нм	R_q , нм
1(исходный)	1,5	2,0
2(200° C, 10 ч.)	1,1	1,7
3(380° C, 10 ч.)	0,65	0,84
4(540° C, 10 ч.)	0,55	0,75

Снижение шероховатости поверхности закономерно приводит к росту отражательной способности изготовленных зеркал. Так для образца, отожженного при $T = 540^\circ\text{C}$, коэффициент отражения на длине волны 1064 нм увеличивается по сравнению с исходным образцом с 0,89 до 0,92, а на длине волны 532 нм – с 0,86 до 0,89.

По результатам испытаний изготовленных зеркал-отражателей на лучевую прочность установлено, что исходного алюминиевого сплава пороговая плотность энергии лазерного излучения составляет 3,5 Дж/см². Это значение значительно превышает порог разрушения ~ 1 Дж/см², зафиксированный для алюминиевых подложек, подвергнутых абразивной или электро-химической полировке [6, 7]. Таким образом, подтверждается перспективность алмазного наноточения, как высокоэффективного метода формирования оптических поверхностей на алюминиевых сплавах с высокой лучевой прочностью.

Термообработка подложек в интервале температур от 200 до 380 °C не приводит к заметному изменению лучевой прочности готовых зеркал-отражателей. Для образца, отожженного при $T = 540^\circ\text{C}$, пороговая плотность энергии лазерного излучения составляет порядка 5 Дж/см², что на $\sim 30\%$ выше, чем для исходного образца. Более детальные исследования характера разрушения поверхности зеркал из алюминиевого сплава АМг2, изготовленных по технологии алмазного наноточения, под воздействием мощных лазерных импульсов показывают, что деградация начинается в областях локализации интрематаллидных включений. Таким образом, увеличение лучевой прочности образца, отожженного при $T = 540^\circ\text{C}$, по сравнению с исходным образцом можно связать с его частичной гомогенизацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтверждают перспективность алмазного наноточения, как высокоэффективного метода обработки оптических поверхностей. Показано, что при изготовлении оптических элементов из алюминиевых сплавов важным фактором является неоднородность структуры исходного материала, связанная с наличием интерметаллидных включений. Термообработка заготовок из сплава АМг2 при $T = 540^\circ\text{C}$ позволяет улучшить качество обработки поверхности и лучевую прочность алюминиевых зеркал как за счет снятия механических напряжений, так и за счет частичной гомогенизации исходного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Guregian, J.J. Material trades for reflective optics from a systems engineering perspective / J.J. Guregian, J.W. Pepi, M. Schwalm, F. Azad // Proc. SPIE. - 2003. - V. 5179. - P. 85–96.
2. Vukobratovich, D. Large stable aluminum optics for aerospace applications / D. Vukobratovich, J.P. Schaefer // Proc. SPIE. - 2011. - V. 8125. - P. 81250T.
3. Zhang, J. Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging/ J. Zhang, X. Zhang, S. Tan, X. Xie // Current Optics and Photonics. - 2017. - V 1, no. 4. - P. 364-371.
4. Li, L.H. Al6061 surface roughness and optical reflectance when machined by single point diamond turning at a low feed rate / L.H. Li, N.H. Yu, C.Y. Chan, W.B. Lee // PLoS ONE. - 2018. - V. 13, no. 4. - P. e0195083.
5. Metal mirrors with excellent figure and roughness / R. Steinkopf [et. al.] // Proc. SPIE. - 2008. - V. 7102. - P. 71020C.
6. Figueira, J.F. Damage thresholds at metal surfaces for short pulse IR lasers/ J.F. Figueira, S.J. Thomas. // IEEE J. Quantum Electronics. - 1982. - V.QE-18. - P. 1381–1386.
7. Jee, Y. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces / Y. Jee, M.F. Becker, R.M. Walser // J. Opt. Soc. Am. B. - 1988. - V.5, no.3. - P. 648-659.

НАНОКОМПОЗИТЫ КРЕМНИЙ-НИКЕЛЬ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ НИКЕЛЯ В ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ

А. Л. Долгий, Р. Л. Новик, В. П. Бондаренко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки,
6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: dolgiy@bsuir.by*

Электрохимическим анодированием в растворе фтористоводородной кислоты на поверхности монокристаллических кремниевых пластин сформированы слои пористого кремния. Методом электрохимического осаждения никеля в пористый кремний получены нанокompозитные структуры кремний-никель. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ использованы для изучения структуры полученных образцов нанокompозитов. Установлены особенности образования и роста частиц никеля на стенках пор при различных временах осаждения. Показано, что при больших временах осаждения (более 60 мин) в матрице пористого кремния возможно получение никелевых нанонитей с диаметрами, соответствующими диаметрам каналов пор и длиной, соответствующей толщине пористого кремния.

Ключевые слова: пористый кремний; никель; электрохимическое осаждение; нанокompозиты.