

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЛОЖЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ ЗЕРКАЛ-ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНОГО НАНОТОЧЕНИЯ

Г.А. Гусаков, Г.В. Шаронов, М.В. Пузырев  
Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем имени  
Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь gga68@rambler.ru

Исследовано влияние предварительной термообработки при различных температурах подложек из алюминиевого сплава АМг2 на характеристики зеркал-отражателей, изготовленных по технологии алмазного точения. Показано, что термообработка заготовок при  $T = 540$  °С 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:** зеркала-отражатели; алюминиевый сплав; лучевая прочность.

## EFFECT OF THERMAL TREATMENT OF SUBSTRATES FROM ALUMINUM ALLOYS ON LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLD OF MIRROR-REFLECTORS, MANUFACTURED BY ULTRA-PRECISION DIAMOND TURNING

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov, M.V. Puzyrev  
Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University,  
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, gga68@rambler.ru

The effect of preliminary heat treatment at different temperatures of aluminum alloy АМg2 substrates on the characteristics of mirror-reflectors manufactured by ultra-precision diamond turning technology was investigated. It is shown that the heat treatment of blanks at  $T = 540$  °С can improve the surface quality and the laser radiation resistance of aluminum mirrors both by removing mechanical stresses and by partially homogenizing the starting material.

**Keywords:** mirror-reflectors; aluminium alloys; laser-induced 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 для изготовления зеркал-отражателей предъявляются жесткие требования: хорошая полируемость, высокая отражательная способность; высокая теплопроводность и минимальный коэффициент линейного расширения, а также минимальные значения физической, химической и индуцированной неоднородности; отсутствие внутренних напряжений. Как показывает практика, оптимальным материалом для изготовления зеркал-отражателей из алюминиевых сплавов является сплав АМг-2. Сплав АМг-2 широко используется на практике при изготовлении различных изделий методами холодной штамповки и обработки резанием. Режимы термообработки этого материала, позволяющие повысить его пластичность, хорошо известны. Вместе с тем, влияние предварительной термической обработки сплава АМг-2 на чистоту поверхности при суперфинишной обработке алмазным точением и на оптические характеристики готовых зеркал-отражателей изучено недостаточно.

### Материалы и методы исследования

Исследованные зеркала-отражатели изготавли-

вались из алюминиевого сплава АМг-2. Исходные заготовки представляли собой диски диаметром 100 мм и толщиной 8 мм. Предварительная механическая обработка поверхности осуществлялась твердосплавным резцом. Термическая обработка проводилась на воздухе в интервале температур от 200 до 540 °С. Длительность термообработки составляла 10 часов. Остывание образцов происходило вместе с печью. Финишная обработка производилась на прецизионном токарном станке модели МК 6501 с использованием специального алмазного резца с радиусом закругления лезвия  $\leq 0,05$  мкм.

Анализ состояния поверхности исходных заготовок из сплава АМг2 и заготовок, подвергнутых механо-термической обработке, проводился методами растровой электронной микроскопии (РЭМ)/электронного микроскопа с использованием электронного микроскопа LEO 1455 VP (Carl Zeiss, Германия) с приставкой Aztec Energy Advanced X-Max 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Кроме того, проводились измерения микротвердости образцов с использованием микротвердомера ПМТЗ. Контроль качества обработки поверхности изготовленных зеркал-отражателей осуществлялся методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro (НТ-МДТ, Россия). Контроль отражательной способности зеркал в спектральном диапазоне 200-2500 нм осуществлялся на прецизионном спектро-

метре Lambda1050 (PerkinElmer, США). Исследование лучевой прочности проводилось с использованием импульсного излучения ( $\lambda = 1,064$  мкм,  $\tau = 20$  нс) YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера модели LS-2137 (Lotis-TII, Беларусь). Измерения проводились в режиме одиночных импульсов. Средняя плотность мощности лазерного излучения на поверхности образца варьировалась в диапазоне от 0.5 до  $7 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

### Результаты и их обсуждение

По данным электронного микроскопа усредненный химический состав исходного алюминиевого сплава соответствует марке АМг2 по ГОСТ 4784-97 (магний – 2.4 мас.%; железо – 0.45 мас.%; марганец 0.35 мас.%; кремний 0.3 мас.%; алюминий – остальное). Однако, для него характерно наличие двух типов интерметаллидных включений, размер которых достигает 10 мкм. Первый тип включений (светлые области на рис. 1) имеет состав Al<sub>4.5</sub>FeMn<sub>0.2</sub>. Второй тип (темные области) имеет состав Al<sub>3</sub>MgSi.

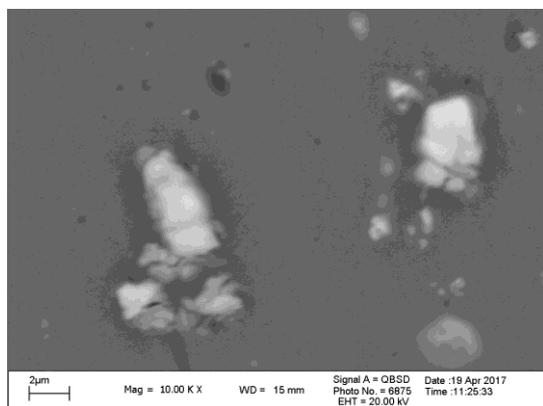


Рис. 1. Микрофотография интерметаллидных включений на поверхности исходного образца

Fig. 1. Micrograph of intermetallic inclusions on the surface of the original sample

Наличие интерметаллидных включений может отрицательно сказываться как на чистоте обработки поверхности алюминиевого сплава, так и лучевой прочности готовых зеркал-отражателей. Отсюда следует необходимость проведения предварительного гомогенизирующего отжига заготовок с целью уменьшения их ликвации. Для сплава АМг2 рекомендуемые температуры гомогенизирующего отжига находятся в интервале 510-540 °С [4]. Кроме того, при механической обработке деталей из сплава АМг2 используются промежуточные низкий и высокий отжиги для частичного или полного разупрочнения материала и повышения его пластичности. Рекомендуемые температурные интервалы низкого и высокого отжигов составляют 150-200 и 350-420 °С, соответственно [4]. Исходя из сказанного выше, для проведения экспериментов нами были выбраны следующие температуры предварительной термообработки заготовок из сплава АМг2: 200, 380 и 540 °С.

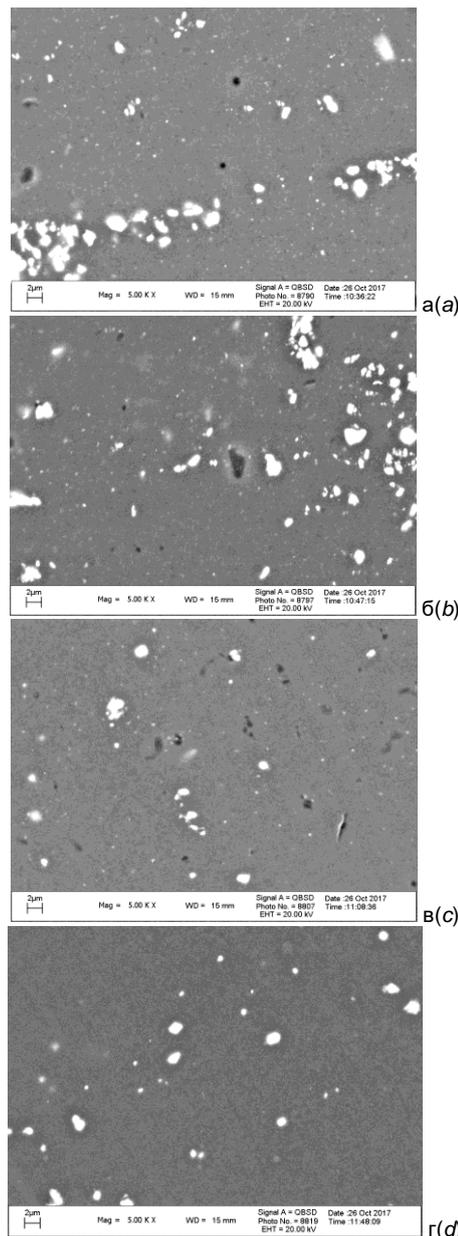


Рис. 2. Микрофотографии поверхности сплава АМг2 после отжига при различных температурах: (а) – исходный образец; (б) – 200 °С; (в) – 380 °С; (г) – 540 °С

Fig. 2. Micrographs of the surface of the АМг2 alloy after annealing at different temperatures: (a) - the original sample; (b) - 200 °С; (c) - 380 °С; (d) - 540 °С

На рис. 2 показано влияние температуры отжига на размеры и состав интерметаллидных включений в сплаве АМг2. Видно, что отжиг при  $T = 200$  °С практически не влияет на структуру поверхности образца. При  $T = 380$  °С начинается уменьшение размеров включений с повышенным содержанием магния. Для включений с повышенным содержанием железа изменений не наблюдается. В результате отжига при  $T = 540$  °С происходит полное исчезновение включений с повышенным содержанием магния. Включения с повышенным содержанием железа сохраняются, хотя и несколько уменьшаются в размерах.

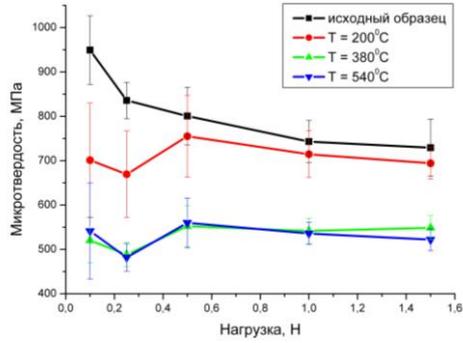


Рис. 3. Зависимость микротвердости от нагрузки для исследованных образцов

Fig. 3. The dependence of microhardness on the load for the studied samples

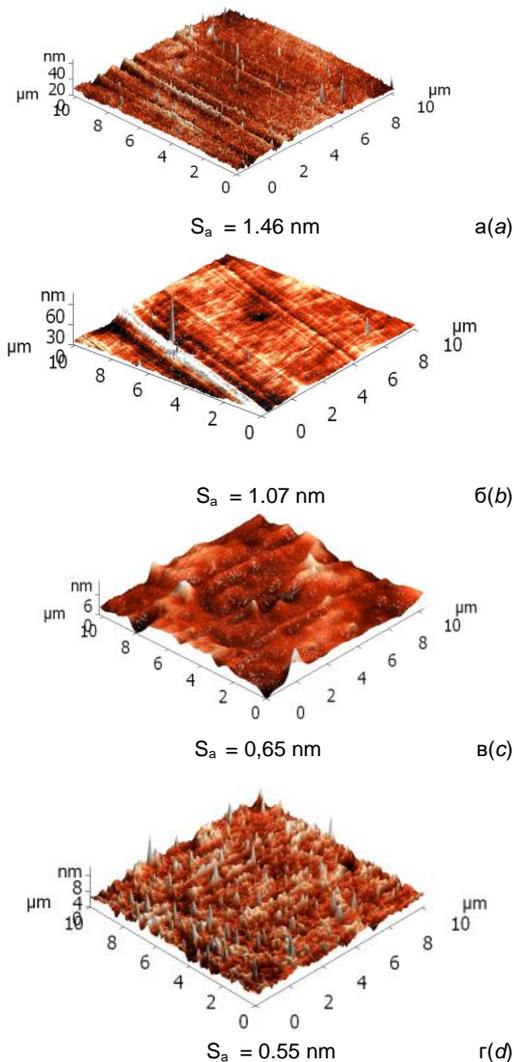


Рис. 4. АСМ изображения рельефа поверхности исследованных образцов после финишной обработки алмазным резцом и измеренные значения шероховатости поверхности  $S_a$ : (а) – исходный образец; (б) – 200 °С; (в) – 380 °С; (г) – 540 °С

Fig. 4. AFM images of the surface relief of the investigated samples after finishing with a diamond cutting tools and the measured roughness values  $S_a$  of the surface: (a) - the initial sample; (b) - 200 °C; (c) - 380 °C; (d) - 540 °C

На рис. 3 приведены результаты влияния отжига при различных температурах на микротвердость заготовок их сплава АМг2. Исходный сплав находится в нагартованном состоянии, поэтому для него наблюдается заметное снижение микротвердости с ростом нагрузки. Отжиг при  $T \geq 200$  °С, как и ожидалось, приводит к разупрочнению поверхности исходного сплава. Микротвердость образцов снижается с ростом температуры отжига вплоть до 380 °С. Дальнейшее увеличение температуры отжига не приводит к заметному изменению микротвердости.

В целом, термообработка оказывает положительное влияние на чистоту обработки поверхности сплава АМг2 алмазным резцом (рис. 4). Так для исходного образца, не подвергавшегося отжигу, после финишной обработки полученное методом АСМ значение параметра шероховатости поверхности  $S_a$  составляет 1,5 нм. Для образца, отожженного при  $T = 200$  °С,  $S_a \sim 1.1$  нм. Для образцов, отожженных при  $T \geq 380$  °С, регистрируется шероховатость поверхности менее 1 нм.

На рис. 5 приведены спектры отражения зеркал, изготовленных из отожженного при различных температурах сплава АМг2 по технологии алмазного наноточения. Для сравнения приведен спектр образца, изготовленного с использованием алмазно-абразивной обработки. Хорошо видно, что алмазное наноточение имеет существенные преимущества перед алмазно-абразивной обработкой за счет снижения светорассеяния на неровностях поверхности зеркал. Для образца, обработанного по технологии алмазного наноточения, коэффициент отражения на длине волны 1064 нм увеличивается с 0.82 до 0.9, а на длине волны 532 нм – с 0.72 до 0.86.

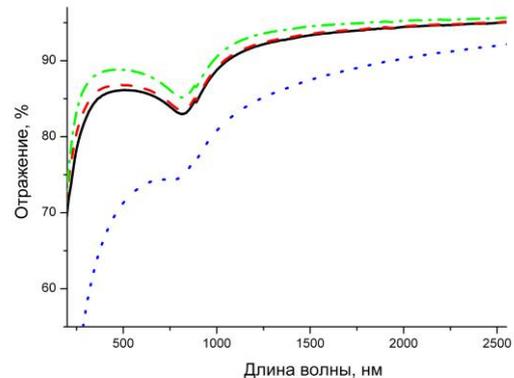


Рис. 5. Спектры отражения зеркал из алюминиевого сплава, изготовленных с использованием различных вариантов механо-термической обработки:

- (—) – без отжига, алмазное точение;
- (- -) – отжиг при  $T = 200$  °С, алмазное точение;
- (- · -) – отжиг при  $T = 540$  °С, алмазное точение;
- (...) – без отжига, алмазно-абразивная обработка

Fig. 5. Reflection spectra of mirrors made of aluminum alloy, made using various variants of mechanical-thermal processing:

- (—) - without annealing, diamond turning;
- (- -) - annealing at  $T = 200$  °C, diamond turning;
- (- · -) - annealing at  $T = 540$  °C, diamond turning;
- (...) - without annealing, diamond abrasive treatment

Подобный эффект, хоть и в меньшей степени, наблюдается и с ростом температуры предварительной термообработки заготовок. Так для образца, отожженного при  $T = 540$  °С, коэффициент отражения на длине волны 1064 нм увеличивается по сравнению с исходным образцом с 0.9 до 0.92, а на длине волны 532 нм – с 0.86 до 0.89. Как уже указывалось выше, увеличение коэффициента отражения коррелирует с изменением шероховатости поверхности образцов.

Рост отражательной способности зеркал приводит к увеличению их лучевой прочности. Согласно полученным нами экспериментальным данным, использование алмазной лезвийной обработки поверхности алюминиевого сплава приводит к увеличению критической плотности мощности лазерного излучения, при которой начинается разрушение поверхности зеркала  $\sim$  в 3 раза (с 0.7 до  $2 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) по сравнению с алмазно-абразивной обработкой. Термообработка заготовок из алюминиевого сплава в температурном интервале 200-380 °С не приводит к заметному изменению лучевой прочности готовых зеркал.

Для образца, отожженного при  $T = 540$  °С, наблюдается рост критической плотности мощности лазерного излучения на 25% до  $2.5 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

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 интреметаллидных включений. На рисунке 6 приведена микрофотография поверхности зеркала после воздействия одиночного лазерного импульса с плотностью мощности  $4 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Хорошо видны раковины размером до 10 мкм, связанные с плавлением материала зеркала под воздействием лазерного излучения. Расположение этих раковин, в целом, совпадает с расположением включений на поверхности исходного зеркала (рис. 2). Таким образом, увеличение лучевой прочности образца, отожженного при  $T = 540$  °С, по сравнению с исходным образцом можно связать с его частичной гомогенизацией.

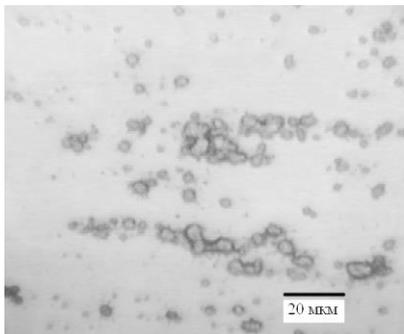


Рис. 6. Микрофотография поверхности зеркала из сплава АМг2 после воздействия одиночного лазерного импульса с плотностью мощности  $4 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

Fig. 6. Micrograph of the surface of the AMg2 aluminum alloy mirror after exposure to a single laser pulse with a power density of  $4 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>.

Из приведенных выше экспериментальных данных следует, что для увеличения лучевой прочно-

сти зеркал из алюминиевых сплавов необходимо добиться полной гомогенизации исходного материала. Однако в ряде случаев этого трудно добиться. Прежде всего, это касается включений железа, которое является обычной примесью для всех алюминиевых сплавов. Из-за крайне низкой растворимости в алюминии железо практически не поддается ликвации [4], что подтверждается результатами настоящей работы. Даже длительный отжиг при температурах вблизи точки плавления сплава АМг2 не приводит к исчезновению включений с преимущественным содержанием железа (рис. 2).

Таким образом, для решения данной проблемы необходимо искать альтернативные технологические подходы. Например, осаждение алюминиевой пленки высокой чистоты на поверхность готового массивного зеркала из алюминиевого сплава.

## Заключение

Проведенные исследования подтверждают перспективность алмазного наноточения, как высокопроизводительного метода обработки оптических поверхностей. Термообработка заготовок из сплава АМг2 при  $T = 540$  °С позволяет улучшить качество обработки поверхности и лучевую прочность алюминиевых зеркал как за счет снятия механических напряжений, так и за счет частичной гомогенизации исходного материала.

Полученные результаты позволяют сформулировать подходы к повышению эффективности наноразмерной алмазной лезвийной обработки алюминиевых сплавов применительно к изготовлению металлических зеркал-отражателей с высокой отражательной способностью и лучевой прочностью.

## Библиографические ссылки

1. Горохов В., Захаревич Е., Скворцова М. Повышение точности деталей металлооптики при алмазном точении на ультрапрецизионном оборудовании. *Фотоника* 2014; (1): 118-123.
2. Vukobratovich D., Schaefer J.P. Large stable aluminum optics for aerospace applications. *Proc. SPIE* 2011; 8125: 81250T (13pp).
3. Zhang J., Zhang X., Tan S., Xie X. Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging. *Current Optics and Photonics* 2017; 1(4): 364-371.
4. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgiya; 1980. 280 с.

## References

1. Gorokhov V., Zakharevich E., Skvortsova M. Povyshenie tochnosti detaley metallooptiki pri almaznom tochenii na ul'traprecizionnom oborudovanii [Accuracy improvement of metal-optical parts during diamond turning on ultra-precision equipment]. *Fotonika* 2014; (1): 118-123. (In Russian).
2. Vukobratovich D., Schaefer J.P. Large stable aluminum optics for aerospace applications. *Proc. SPIE* 2011; 8125: 81250T (13pp).
3. Zhang J., Zhang X., Tan S., Xie X. Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging. *Current Optics and Photonics* 2017; 1(4): 364-371.
4. Kolachev B.A., Gabidullin R.M., Piguzov Yu.V. Tekhnologiya termicheskoy obrabotki tsvetnykh metallov i splyavov [Heat treatment technology of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1980. 280 p. (In Russian).