

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.373.826: 621.787+620.178.16
DOI: 10.35211/1990-5297-2024-8-291-7-10

И. А. Бакулин, С. И. Кузнецов, С. И. Ярьско, А. С. Панин

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

Самарский филиал ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

E-mail: bi205@fian.smr.ru; kuznetsov@fian.smr.ru; yarsi54@gmail.com; anton@fian.smr.ru

Представлены результаты исследований структуры и износных характеристик алюминиевого деформируемого сплава АМг6 после лазерной ударной обработки. Методами оптической и растровой электронной микроскопии не выявлено заметных отличий между микроструктурой необработанных и обработанных образцов. Показано, что сжимающие остаточные напряжения наблюдаются на глубине до 1,5 мм и в максимуме достигают значения 240 МПа, а износостойкость сплава в результате лазерного наклепа увеличивается на 20 %.

Ключевые слова: износостойкость, алюминиевый сплав, лазерная ударная обработка, сжимающие остаточные напряжения

I. A. Bakulin, S. I. Kuznetsov, S. I. Yaresko, A. S. Panin

THE EFFECT OF LASER SHOCK PEENING ON THE WEAR RESISTANCE OF THE ALUMINUM ALLOY AMg6

Samara Branch of P. N. Lebedev Physical Institute

The results of studies of the structure and wear characteristics of the wrought aluminum alloy AMg6 after laser shock peening are presented. Optical and scanning electron microscopy revealed no noticeable differences between the microstructure of untreated and processed samples. It is shown that compressive residual stresses are observed at a depth of up to 1.5 mm and reach a maximum value of 240 MPa. After laser shock peening the wear resistance of the alloy increases by 20 %.

Keywords: wear resistance, aluminum alloy, laser shock peening, compressive residual stresses

Метод лазерного ударного упрочнения (или лазерный наклеп) является одним из перспективных способов повышения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения. Суть технологии лазерного наклепа заключается в воздействии коротким лазерным импульсом большой плотности мощности на обрабатываемую поверхность через прозрачный для излучения слой (вода, стекло и т. д.). Под воздействием излучения образуется приповерхностная плазма, которая и формирует направленную ударную волну. Ударная волна создает в поверхностном слое обрабатываемого материала, как и при механической ударной обработке, напряжения сжатия. В силу этого, традиционно метод лазерной ударной обработки

(ЛЮО) используется для увеличения усталостной прочности, повышения стойкости к износу при контактной усталости, повышения коррозионной стойкости и износостойкости деталей машиностроительного производства.

В отличие от механического наклепа, фронт ударной волны после ЛЮО плоский, рельеф поверхности после обработки изменяется минимально, а глубина упрочнения может достигать 2 мм. Стойкость изделий к циклическим нагрузкам после такой обработки может увеличиться от 30 до 200 % и более. ЛЮО имеет большие преимущества перед методами механического наклепа сталей и сплавов, например, ультразвуковой или дробеструйной обработками. Так, глубина залегания остаточных напря-

жений сжатия после ЛУО может в 4–5 раз превышать таковую при дробеструйной обработке [1]. При ЛУО возможна обработка труднодоступных участков изделий: кромок, углублений, пазов и т. д. Одним из достоинств ЛУО является также возможность упрочнения изделий сложной формы и обработки по заданному контуру. Процесс ЛУО может быть интегрирован в производственную линию с высокой степенью автоматизации.

Лазерному ударному упрочнению подвергаются, прежде всего, изделия из материалов, используемых в авиационной промышленности: алюминиевые, титановые и никелевые сплавы, стали.

Среди указанных материалов отметим алюминиевые сплавы, которые являются перспективным триботехническим материалом, поскольку обладают рядом полезных функциональных свойств. Однако номенклатура антифрикционных алюминиевых сплавов сильно ограничена [2] по причине склонности алюминия к схватыванию при сухом трении в паре со сталью. Как следствие, материал на участках схватывания вырывается из основы и переносится на сопряженную поверхность, образуя там наросты. Большое их количество может привести к ускоренному износу, и, в конечном итоге, к заеданию узла трения и поломке изделия.

Цель настоящей работы – исследование трибологических свойств и напряженного состояния алюминиевого деформируемого сплава АМг6 после лазерной ударной обработки.

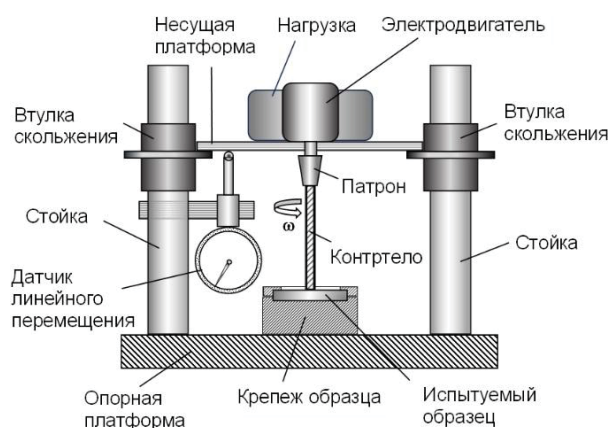


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки для испытаний на износ

При испытаниях в качестве контртела – «пальца» использовался полый цилиндр диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм, изготовленный из закаленной стали 40Х. Вращение

В экспериментах использовались нарезанные из стержня поликристаллического промышленного сплава АМг6 образцы толщиной 6 мм, диаметром 25 мм до и после ЛУО без поглощающего покрытия излучением с длительностью импульсов 10 нс, плотностью мощности 4,4 ГВт/см² и плотностью импульсов 2000 имп/см². Выбор сплава АМг6 в качестве объекта исследования обусловлен его широким применением в технике, а также отсутствием работ по ЛУО такого сплава и анализу его износных характеристик после лазерного наклепа.

Для изучения микроструктуры использовались оптический микроскоп Neophot 30, сканирующий электронный микроскоп Jeol-6390А с энергодисперсионной приставкой рентгеноспектрального микроанализа Jeol LED-2300. Микротвердость материалов измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 50 г. Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с использованием CuK_α -излучения. Распределение остаточных напряжений σ по глубине получено рентгеновским методом $\sin^2\psi$ и послойной электролитической полировкой. Остаточные напряжения в исходном сплаве АМг6 близки к нулю.

Испытания на трение скольжения проводились по схеме «диск–палец» на разработанной лабораторной установке, позволяющей проводить измерения износных характеристик по глубине (рис. 1).

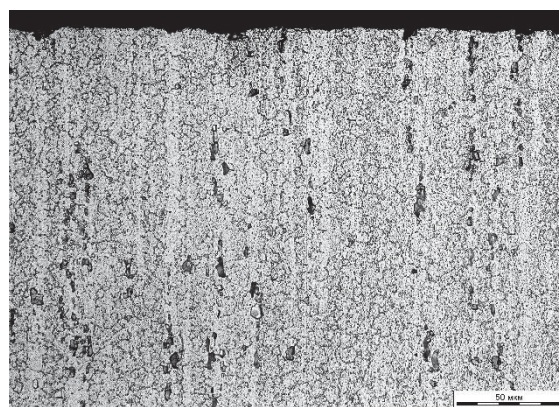


Рис. 2. Микроструктура сплава АМг6 в исходном состоянии

цилиндра со скоростью 500 об/мин осуществлялось без смазывающей жидкости по плоскости образца. Во всех случаях давление в зоне контакта было равно 2,8 МПа. В ходе испыта-

ний с помощью пирометра НТ-819 проводился замер температуры испытываемой пары трения, которая не превышала 45 °С.

В исходном состоянии в исследуемом материале наблюдаются выраженная полосчатая структура расположения зерен, а также строчки интерметаллидов и других нерастворимых соединений, выстроенных вдоль осевого направления исходного прутка. Эти соединения имеют достаточно сложный состав и включают, кроме Al, чаще всего Mg, Mn, Fe либо Mg, Mn, Si, Fe. Зерна исходного сплава АМг6 размерами 3–10 мкм имеют округлую форму (рис. 2). Рентгеноструктурный анализ показывает преимущественную ориентацию параллельно обрабатываемой поверхности кристаллографических плоскостей {111} и {100}, которая остается почти неизменной после ЛУО. Увеличение микротвердости после ЛУО с максимумом на поверхности до 100 HV_{0,05} (микротвердость исходного сплава 80 HV_{0,05}) однозначно фиксируется до глубины 0,8 мм.

В результате взаимодействия тонкого слоя расплавленного материала, образующегося на поверхности при ЛУО, с активным кислородом приповерхностной плазмы и парами воды формируется тонкая окисная пленка, содержащая, согласно элементному анализу, до 30–40 ат.%



Рис. 3. Сечение канавки износа образцов сплава АМг6: а – после ЛУО; б – без ЛУО

Относительный прирост износостойкости сплава АМг6, согласно экспериментальным результатам при указанных выше параметрах ЛУО, составляет $\varepsilon_{\text{и}} \approx 21\%$. Полученные результаты коррелируют с данными износных испытаний, выполненных по схеме «валик – плоскость» алюминиевого деформируемого

кислорода [3]. Наряду с окисной пленкой растровая электронная микроскопия показывает наличие рекристаллизованного слоя, образующегося в результате сильной пластической деформации. Общая толщина оксидного и рекристаллизованного слоев в зависимости от параметров обработки может достигать 70 мкм. Наличие данных структур на поверхности позволяет предположить, что на стадии приработки при трении будет снижена вероятность процесса схватывания и образования наростов, что в конечном итоге окажет влияние на износостойкость сплава в целом.

Оценка линейного износа при испытаниях проводилась с помощью микрометра часового типа и после испытаний на поперечном шлифе с помощью оптического микроскопа (рис. 3). Истирающую способность поверхности определяли по зависимости приращения линейного износа от интервала пути трения. В качестве оценочного показателя износостойкости был использован безразмерный показатель износостойкости И, рассчитываемый по формуле [4]:

$$И = \frac{\Delta L}{\Delta h},$$

где ΔL – интервал пути трения, измеряемый в единицах пути трения, Δh – приращение линейного износа (рис. 4).

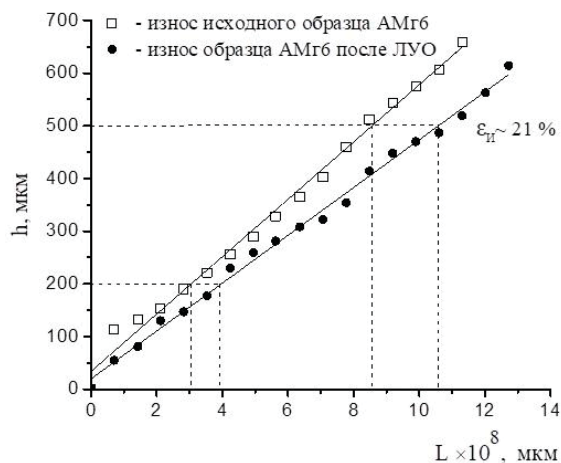


Рис. 4. Линейный износ в зависимости от пути трения

сплава 6061-T6 (аналог сплав АД33) с использованием в качестве контртела инструментальной стали В01 (65HRC) (аналог – сталь 9ХВГ), где прирост износостойкости составил 68 % [5]. В этом случае сжимающие остаточные напряжения величиной до 200 МПа фиксировались на глубине до 1,1 мм, и было отмечено, что

распределение остаточных напряжений влияет на скорость изнашивания сплава.

Наблюдаемое в экспериментах увеличение износостойкости сплава АМг6 после ЛУО, как и в [5], обусловлено изменением напряженного состояния в зоне лазерной обработки и дислокационного рельефа по глубине. Профили остаточных напряжений представлены на рис. 5, глубина остаточных сжимающих напряжений достигает 1400 мкм. Распределение остаточных напряжений (рис. 5) связано с дислокационной структурой в зоне обработки и обусловлено послойным изменением плотности дислокаций по глубине. По данным [6] на поверхности необработанного материала размер областей когерентного рассеяния (ОКР) $D = 120\text{--}130$ нм, величина микродеформаций $\varepsilon = 0,0009$ и плотность дислокаций $\rho \approx 8,0 \cdot 10^{13}\text{--}8,8 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$. Как и в [3; 6], плотность дислокаций определяли методом анализа профиля рентгеновской дифракционной линии (200). Согласно расчетам после ЛУО образцов толщиной 6 мм структурные характеристики поверхности: $D \approx 43$ нм, $\varepsilon \approx 0,002$, плотность дислокаций $\rho \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

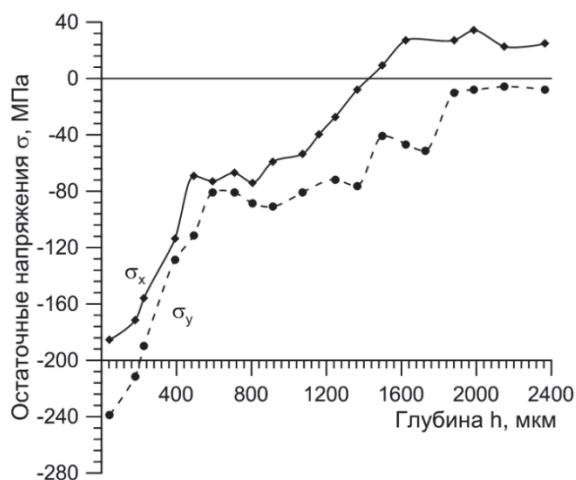


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений после ЛУО:

σ_x – напряжения вдоль направления сканирования;
 σ_y – напряжения поперек направления сканирования

Анализ показывает, что наиболее интенсивные процессы пластической деформации, судя по изменениям плотности дислокаций, происходят до глубины 400–500 мкм. Далее, на участке глубин до 800 – 900 мкм наблюдается бо-

лее плавное уменьшение ρ и увеличение ОКР, затем снижение плотности дислокаций до их значений в необработанном сплаве. Такой характер распределения структурных характеристик вполне коррелирует с распределением соответствующих остаточных сжимающих напряжений. Исходя из зависимости плотности дислокаций и ОКР от глубины, можно приблизительно определить глубину пластической деформации при ударном воздействии.

Выполненные исследования позволяют утверждать, что лазерная ударная обработка является эффективным способом повышения износостойкости изделий из алюминиевых деформируемых сплавов. При ЛУО без покрытия сплава АМг6 с плотностью мощности 4,4 ГВт/см² при испытаниях на трение скольжения износостойкость увеличивается более чем на 20 %. Основной причиной роста износостойкости является увеличение плотности дислокаций в зоне обработки и коррелирующее с ним распределением остаточных сжимающих напряжений, распространяющихся на глубину до 1,5 мм и достигающих максимального значения в 240 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Achintha M., Nowell D. Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening // J. Mater. Process. Technol. – 2011. – V.211, Iss.6. – PP. 1091-1101. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.01.011
2. ГОСТ 14113–78. Сплавы алюминиевые антифрикционные. Марки. – М. : ИПК Издательство Стандартов, 2003. – 4 с.
3. Bakulin I. A., Kuznetsov S. I., Panin A. S. and Tarasova E. Yu. Laser Shock Processing of AMg6 Alloy without Coating // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – V.13, №3. – PP. 619-625. <https://doi.org/10.1134/S2075113322030054>
4. ГОСТ 23.001–2004. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2005. – 8 с.
5. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing / U. Sánchez-Santana, C. Rubio-González, G. Gomez-Rosas et al. // Wear. – 2006. – V.260, Iss.7-8. – PP. 847-854. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.014>
6. Effect of preliminary heat treatment of the formation of structure and residual stresses in the AMg6 alloy at laser shock peening without coating / I.A. Bakulin, S.I. Kuznetsov, A.S. Panin et al. // Journal of Russian Laser Research. – 2024. – V.45, №2. – PP. 237-248. <https://doi.org/10.1007/s10946-024-10207-4>