

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМГ6 И СТАЛИ 20ГЛ ПРИ КОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

А.В. Бялонович ^а, Л.Е. Матохнюк ^а, Б. Н. Мордюк ^б, Г.И. Прокопенко ^б

^а Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Украина

^б Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Украина

Abstract. The influence of complex processing (electric spark alloying + ultrasonic impact treatment) on mechanical properties of AMG6 alloy and 20GL cast steel is studied. Using X-ray analysis, it has been established that such processing changes the phase composition and microstructure, forms residual compressive macro stresses and reduced surface roughness. Thus, the mechanical properties of alloys, above all, the wear resistance and fatigue strength are increased.

В настоящее время все большее распространение в промышленности, транспорте и строительстве получают деформируемые алюминиевые сплавы. Они обладают достаточно высокой конструкционной прочностью и хорошей пластичностью. В то же время действие циклических нагрузок при эксплуатации может приводить к деградации поверхностных слоев, что существенно снижает усталостную долговечность изделий [1, 2].

Наиболее распространенным методом упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов является поверхностная пластическая деформация (ППД) [3]. Наряду с традиционной дробеструйной обработкой высокую эффективность показывает ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) [4]. Однако в таких материалах, как сплав АМГ6, возможности деформационного упрочнения ограничены. УЗУО была успешно применена для получения композитных слоев в алюминии [5] и сплаве АМГ6 [6]. Такая обработка позволяет достичь равномерного распределения дисперсных упрочняющих частиц и модифицировать структуру в поверхностном слое толщиной до 50-60 мкм. Применение электроискрового легирования (ЭИЛ) для предварительного легирования, а также последующее деформирование с помощью УЗУО дает возможность получать модифицированные слои с улучшенными свойствами за счет формирования дисперсных упрочняющих фаз, создания сжимающих напряжений и улучшения качества поверхности.

Электроискровая обработка ведет к образованию на поверхности детали слоя, который обладает отличными от исходного состояния структурой и свойствами, зависящими от параметров искрового разряда, состава электродного материала, материала обрабатываемой детали и других факторов. Трудности в получении равномерно упрочненных слоев требуемой шероховатости и плотности связаны также с тем, что применяемые установки для ЭИЛ часто снабжены ручным вибратором. Неравномерная обработка снижает надежность и долговечность эксплуатации упрочненных изделий.

Перспективным путем создания покрытий и модифицированных слоев с заданными свойствами может быть использование комбинированных воздействий, например, сочетание электроискровой и ультразвуковой ударной обработок. С помощью УЗУО удастся получать упрочненные поверхностные слои с низкой шероховатостью поверхности, что позволяет уменьшить вероятность возникновения поверхностных трещин при циклическом нагружении [7, 8]. Формируемые при этом сжимающие напряжения должны положительно сказаться на сопротивлении усталости.

ЭИЛ образцов проводили на промышленной установке «Элитрон-22А» на воздухе при удельной длительности обработки поверхности образца 1 мин/см², продолжительности, энергии и частоте электрических импульсов 200 мкс, 1,0 Дж и 50±3 Гц, соответственно. Использовали титановый, вольфрамовый и медный аноды. Выбранный режим обработки обеспечивал толщину легированного слоя в пределах 25...50 мкм. Шероховатость поверхности измеряли на профилографе П-210. После ЭИЛ она

составила $R_z \approx 10$ мкм. Режим УЗУО был выбран следующий: амплитуда ультразвуковых колебаний $A = 15$ мкм, время обработки τ изменялось от 15 до 60 с.

В случае УЗУО без ЭИЛ увеличение длительности обработки ведет к незначительному монотонному росту микротвердости (рис. 1). Использование ЭИЛ + УЗУО в течение 30 с вызывает более существенное упрочнение: в случае легирования титаном в 2,5 раза, вольфрамом – в 2,75 раза и, в случае легирования медью, максимально, в 3,6 раза. Увеличение микротвердости при ЭИЛ обусловлено совокупностью ряда факторов, вызванных легированием алюминия элементами материала анода (титан, вольфрам, медь). Рентгеновские исследования показывают, что в поверхностном слое происходят сложные превращения с образованием твердых растворов $AlTi$ и $AlCu$, а также с формированием дисперсных выделений упрочняющих фаз (Al_3Ti , $Al_{18}Ti_2Mg_3$, $Al_{12}W$, Al_5W , Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_6Mg_4Cu). УЗУО легированных слоев ведет к созданию сжимающих остаточных напряжений, а также к диспергированию структуры и снижению шероховатости поверхности. Кроме того, содержание материалов использованных электродов (Ti, W, Cu) в чистом виде практически не наблюдается.

Особый интерес представляют данные по существенному упрочнению сплава $AlMg6$ медью. Применение медного электрода приводит к разнообразию фазовых составляющих поверхностного слоя. Согласно рентгеновским данным и диаграмме состояний тройной системы $Al-Cu-Mg$, возможно формирование θ -фазы Al_2Cu (тетрагональная решетка), S -фазы Al_2CuMg (орторомбическая решетка), T -фазы Al_6CuMg_4 (кубическая) при существенном содержании твердого раствора замещения $Al-Cu$ с ГЦК решеткой (рис. 2). Действительно, повышение содержания меди в сплаве $AlMg6$, по химическому составу приближает поверхностный слой к дуралюминам. Причем, согласно рентгенографическим данным в поверхностном слое после ЭИЛ+УЗУО в основном наблюдается стабильная фаза Al_2Cu – конечный продукт цепочки фазовых превращений зон Гинье-Престона.

Низколегированные стали также широко применяются в промышленности, особенно в транспортном машиностроении. Детали и изделия из этих сталей часто подвергаются циклическим нагрузкам, поэтому важной задачей является повышение усталостных характеристик, что можно достичь разными методами упрочнения поверхности, в том числе и с помощью интенсивной пластической деформации. Однако традиционные методы во многом себя исчерпали, поэтому все чаще прибегают к комбинированию различных технологий, стремясь получить больший технический эффект. С этой целью были проведены эксперименты по совмещению ЭИЛ и УЗУО на стали 20ГЛ. Наиболее удачным элементом для легирования оказался хром.

УЗУО и ЭИЛ стандартных гладких образцов для усталостных испытаний проводили на устройствах, установленных в суппорте токарного станка [6, 7], в условиях вращения образца и смещения хромового анода или узла нагружения вдоль его оси. Скорость

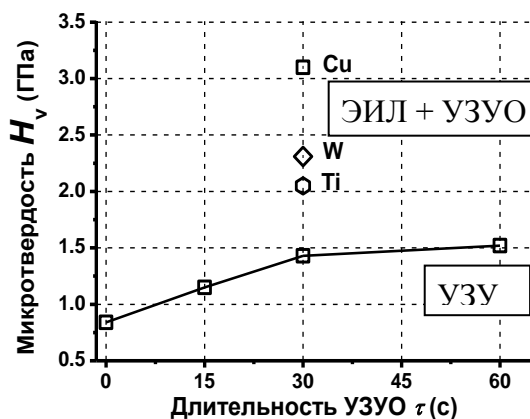


Рис.1. Зависимость микротвердости от времени УЗУО и материала электрода при ЭИЛ + УЗУО.

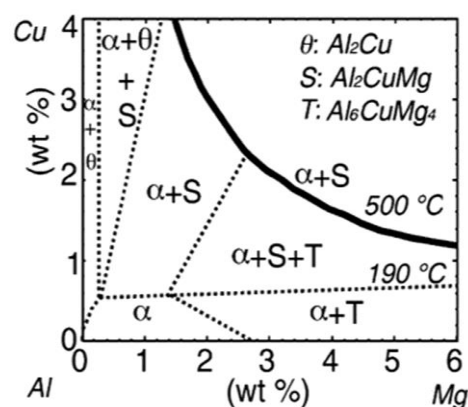


Рис. 2. Равновесная диаграмма состояний тройной системы $Al-Mg-Cu$ [9].

вращения образца составляла 132 об/мин, а ультразвуковой ударный инструмент перемещался со скоростью 0,1 мм/об. Контактно-сдвиговая схема ударного нагружения при УЗУО позволяет существенно снизить шероховатость поверхности, а также сформировать значительные сжимающие остаточные напряжения в слое, толщина которого и степень упрочнения зависят от величины как нормальной, так и сдвиговой составляющей удара.

Для определения характеристик сопротивления усталости после различных обработок были проведены испытания на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400 при симметричных циклах растяжения - сжатия [6]. Были испытаны образцы АМг6 и 20ГЛ в исходном состоянии и после УЗУО. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

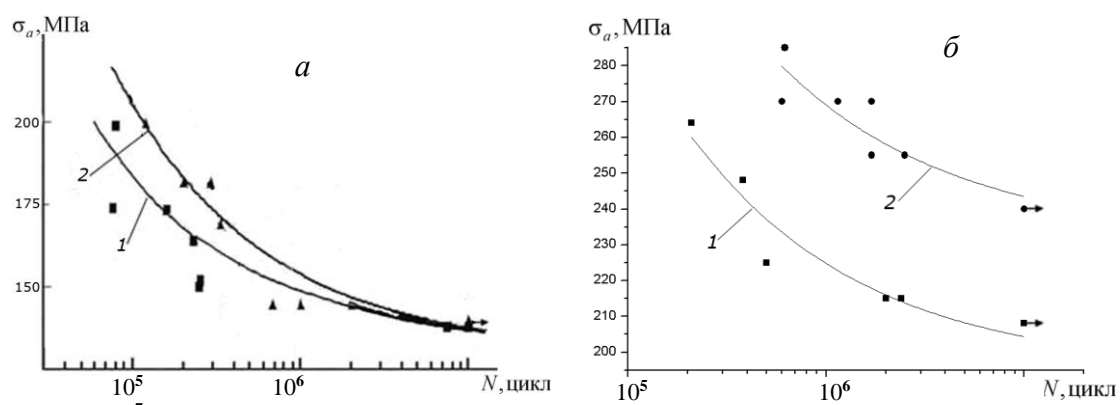


Рис. 3. Результаты испытаний на усталость: *a* – образцы из сплава АМг6, *б* – образцы из стали 20ГЛ. 1 – исходное состояние после шлифования, 2 – после УЗУО.

Как показали испытания, в результате УЗУО сопротивление усталости образцов АМг6 возрастает незначительно (рис.3, *a*, кривая 2). Эффект упрочнения практически сводится к нулю при количестве циклов нагружения 10^7 . Возможно, это связано с релаксацией остаточных напряжений сжатия и процессами разупрочнения в алюминиевом сплаве при длительной воздействию циклической нагрузки. Известно, что процессы возврата в алюминии и магналиях могут происходить и при комнатных температурах. В то же время сопротивление усталости образцов стали 20ГЛ возросло в среднем на 15% (рис.3, *б*, кривая 2). Данное увеличение сопротивления усталости сохранялось на всем интервале исследованных нагрузок вплоть до предела выносливости на базе 10^7 циклов. Релаксации напряжений, а следовательно и уменьшения предела выносливости, не наблюдается.

Для оценки влияния методов комбинированной поверхностной обработки (ЭИЛ+УЗУО) усталостные испытания проводились на четырех партиях образцов, результаты которых приведены на рис. 4.

Как показали усталостные испытания, в результате УЗУО сопротивление усталости материала возросло в среднем на 15 % (рис. 4, кривая 3) Данное увеличение характеристик сопротивления усталости сохранялось на всем интервале исследованных нагрузок вплоть до предела выносливости на базе 10^7 циклов. Применение ЭИЛ после УЗУО снижало указанный эффект. Однако следует отметить, что усталостная кривая все же находится выше (на 5...8%) кривой для исходной партии образцов (рис. 4, кривая 2), несмотря на действие остаточных растягивающих напряжений, вызванных плавлением/застыванием микрообластей поверхности при действии электрических разрядов. Это вызвано наличием компенсаторных сжимающих напряжений, целенаправленно сформированных в поверхностном слое предварительной УЗУО, и развитой дефектной структурой поверхностного слоя.

Образцы после УЗУО с последующим ЭИЛ и с завершающей УЗУО обработкой показали наилучшие характеристики сопротивления усталости. Предел выносливости после указанной обработки вырос на 30 % по сравнению с образцами в исходном состоянии (рис. 4, кривая 4). Следует отметить, что большую пологость кривой 4, по сравнению с кривой 3, можно объяснить тем, что переменные напряжения в верхней части кривой усталости были близки к пределу текучести материала.

Для сплава АМгб наблюдается релаксация остаточных сжимающих напряжений в области многоциклового усталости. Поэтому ультразвуковую обработку алюминиевого сплава АМгб можно рекомендовать только для изделий, подвергающихся в процессе эксплуатации числу циклов, не превышающему 10^6 .

Таким образом, можно заключить, что для упрочненных УЗУО образцов стали 20ГЛ положительный эффект остаточных сжимающих напряжений сохраняется на всем протяжении испытаний до 10^7 циклов, а зарождение трещины происходит не на поверхности, а в приповерхностном слое [8]. При этом эффект релаксации напряжений не проявляется и не оказывает существенного влияния на характеристики сопротивления усталости.

Литература

1. Патон Б.Е. Перспективы применения сварки при создании самолетов нового поколения / Б.Е. Патон, А.Я. Ищенко, К.А. Ющенко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 26-29.
2. Шонин В.А. Сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов с учетом влияния остаточных напряжений. Автореферат, к.т.н. – Киев. – 1984. – 22 с.
3. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. – М: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. Белоцкий А.В., Винниченко В.Н., Муха И.М. Ультразвуковое упрочнение металлов. – Киев: Техника, 1989. – 168 с.
5. Прокопенко Г.И. Упрочнение поверхностного слоя алюминиевого сплава АМгб с помощью комбинированной электроискровой и ультразвуковой ударной обработки/ Г.И. Прокопенко, Б.Н.Мордюк, В.Ф. Мазанко и др.// Металлофиз. Новейш. Технол. – 2013. – 35, №10. – С. 1391–1406.
6. Mordyuk V.N. Enhanced fatigue durability of Al-6Mg alloy by applying ultrasonic impact peening: Effects of surface hardening and reinforcement with AlCuFe quasicrystalline particles / V.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman et al. // Mater. Sci. Eng. – 2013. – A 563. – P. 138–146.
7. Mordyuk V.N. , Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for surface properties' management // J. Sound & Vibration. – 2007. – 308. – P. 855–866.
8. Mordyuk V.N. Improved fatigue behavior of low-carbon steel 20GL by applying ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying / V.N.Mordyuk, G.I. Prokopenko, L.E. Matokhnyuk, A.V. Byalonovich et al. // Mater. Sci. Eng.– 2016.– A 659. – P. 119–129.
9. Raviprasad K. Precipitation processes in an Al-2.5Cu-1.5Mg (wt. %) alloy microalloyed with Ag and Si / K. Raviprasad, C.R Hutchinson., T. Sakurai et al. // Acta Mater.– 2003.– 51. – P. 5037–5050.

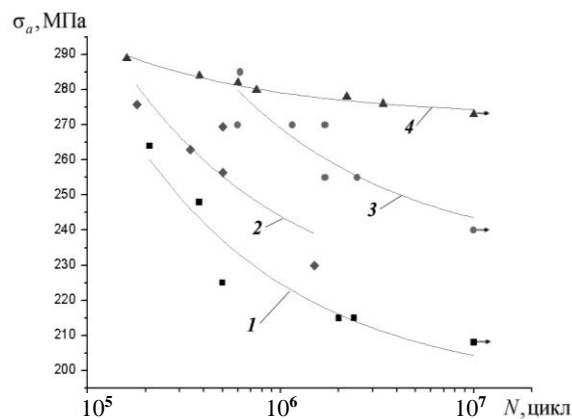


Рис. 4. Результаты испытаний на усталость образцов из стали 20ГЛ: 1 – в исходном состоянии, 2 – после УЗУО с последующим ЭИЛ, 3 – после УЗУО, 4 – после УЗУО с последующим ЭИЛ и завершающей УЗУО.