

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА УСТАЛОСТЬ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg

Н.В. Гущина¹⁾, В.В. Овчинников¹⁾, К.В. Шаломов¹⁾, Д.И. Вичужанин²⁾

¹⁾Институт электрофизики УрО РАН, ул. Амундсена 106, 620016 Екатеринбург, Россия,
guscha@rambler.ru, viae05@rambler.ru, icsartf@gmail.com

²⁾Институт машиноведения УрО РАН,
ул. Комсомольская 34, 620049 Екатеринбург, Россия, mmm@imach.uran.ru

Проведено исследование влияния облучения ионами Ar⁺ с энергией 20 кэВ на сопротивление усталости горячепрессованных профилей толщиной 6 мм из сплава D16 системы Al-Cu-Mg после закалки и естественного старения. Установлено, что кратковременное двухстороннее облучение ионами Ar⁺ флюенсами $F = 2 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² при отсутствии нагрева образцов приводит к существенному увеличению количества циклов до разрушения в условиях пониженных амплитуд нагрузок $\sigma/\sigma_b = 0.3$. Максимальное увеличение в 2.4 раза наблюдается при меньшем флюенсе ионов $F = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; облучение ионами; радиационно-динамические эффекты; усталость.

EFFECT OF ION IRRADIATION ON FATIGUE OF AL-CU-MG ALLOY PRESSED PROFILES

Natalia Gushchina¹⁾, Vladimir Ovchinnikov¹⁾, Konstantin Shalomov¹⁾, Dmitriy Vichuzhanin²⁾

¹⁾Institute of Electrophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 106 Amundsena Str.,
620016 Yekaterinburg, Russia, guscha@rambler.ru, viae05@rambler.ru, icsartf@gmail.com

²⁾Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya Str., 620049 Yekaterinburg, Russia, mmm@imach.uran.ru

The study of the effect of irradiation with Ar⁺ ions on the fatigue resistance of hot-pressed profiles 6 mm thick made of alloy D16 of the Al-Cu-Mg system after quenching and natural aging has been carried out. The samples were irradiated using an ILM-1 ion-beam treatment facility equipped with a PULSAR-1M ion source based on a glow discharge with a cold hollow cathode. The following irradiation parameters were used: $E = 20$ keV, $j = 200$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, $F = 2 \cdot 10^{15}$ and $1 \cdot 10^{16}$ cm⁻². The maximum temperature to which the samples were heated during irradiation did not exceed 40°C. The specimens were tested on an INSTRON 8801 servo-hydraulic test rig. To determine the Weller fatigue curve, cyclic fatigue tests were performed in a sinusoidal cycle with a loading frequency of 3 Hz. The cycle unbalance factor (asymmetry coefficient) is -1. It was found that short-term double-sided irradiation with Ar⁺ ions with an energy of 20 keV with the indicated fluences in the absence of heating of the samples leads to a significant increase in the number of cycles to failure under conditions of reduced load amplitudes $\sigma/\sigma_b = 0.3$. The maximum increase in 2.4 times is observed at a lower ion fluence $F = 2 \cdot 10^{15}$ cm⁻². This phenomenon may be due to the fact that under conditions of high-cycle fatigue, only small elastic deformations take place. In addition, the surface and volume of the irradiated sample undergo "instantaneous" (within a few seconds) radiation annealing with an ion beam, as a result of which both the surface and the volume are practically freed from deformation defects. Because of this, destruction begins from the surface of the sample much later, since the processes of damage accumulation and cracking develop much more slowly. In the case of low-cycle fatigue, elastoplastic deformations take place and defects accumulate over the entire cross section of the specimen. The data obtained indicate the possibility of using ion-beam treatment at the finishing stages of the production of promising aluminum alloys.

Keywords: aluminum alloys; ion irradiation; radiation-dynamic effects; fatigue.

Введение

Ионная имплантация металлических материалов рассматривается как один из методов повышения их долговечности при работе в условиях усталости [1-3]. В

ходе ионной бомбардировки ионами средних энергий в течение триллионных долей секунды происходит переплавление наноразмерных поверхностных слоев металла (вследствие формирования терми-

ческих пиков: зон диаметром 10-20 нм, разогреваемых до 3000-6000 К), но не одновременно, а по мере внедрения отдельных ионов (время образования и остывания термического пика $\sim 10^{-11}$ с). Этот эффект может приводить к залечиванию нано- и микротрещин. Кроме того, внедряемые примеси способствуют созданию сжимающих напряжений вблизи поверхности материалов. С учетом сказанного, а также дальнедействующих динамических эффектов улучшения структуры, вследствие распространения послекаскадных ударных волн [4], можно ожидать повышения механических и ресурсных характеристик сплавов (за счет изменения структуры как поверхности, так и объема облучаемых сред).

Целью работы явилось исследование влияния облучения ионами Ar^+ на сопротивление усталости горячепрессованных профилей из сплава Д16 системы Al-Cu-Mg в состоянии поставки – после закалки и естественного старения.

Материалы и методы исследования

Горячепрессованные профили ПР-100-23 (толщиной 6 мм) из сплава Д16 (Al-Cu-Mg) после естественного старения при комнатной температуре были предоставлены ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод». Из указанных профилей предварительно были изготовлены стандартные образы для усталостных испытаний.

Облучение образцов проводилось на установке для ионно-лучевой обработки ИЛМ-1, оснащенной ионным источником ПУЛЬСАР-1М на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом [5]. Из цилиндрического пучка ионов с помощью коллиматора вырезался ленточный пучок ионов 100×20 мм². С целью снижения температуры нагрева образцы облучали с двух сторон при их перемещении под ионным пучком со скоростью 2.5 см/с. В ходе облучения контролировалась температура образцов с помощью хромель-алюмелевой термопары, приваренной к

аналогичному образцу-свидетелю, и компьютерной системы измерения цифровых сигналов на базе модулей ADAM-4000. Максимальная температура, до которой разогревались образцы в ходе облучения не превышала 40-50°C. Параметры облучения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры облучения непрерывными пучками ионов Ar^+ профилей из сплава Д16
Table 1. Parameters of Ar^+ ion beam irradiation of the D16 alloy profiles in continuous mode

№ режима	Энергия ионов E , кэВ	Плотность ионного тока j , мкА/см ²	Время облучения (с одной стороны) t , с	Флюенс ионов (с одной стороны) F , см ⁻²
1	20	200	1,6	$2 \cdot 10^{15}$
2			8	$1 \cdot 10^{16}$

Испытания образцов проведены на сервогидравлической испытательной установке INSTRON 8801. Испытательная установка снабжена ЭВМ и контроллером FastTrack. Все операции в процессе эксперимента выполняются программно-аппаратными средствами. Для определения кривой усталости Веллера выполнены циклические испытания на усталость по синусоидальному циклу с частотой нагружения 3 Гц. Коэффициент несимметрии цикла равен –1.

Результаты и их обсуждение

Кривые Веллера, построенные по результатам испытаний исходных и облученных образцов сплава Д16 приведены на рис. 1.

Видно, что после облучения в использованных режимах наблюдается существенное увеличение количества циклов до разрушения в условиях $\sigma/\sigma_b = 0,3$. Для исходного образца число циклов до разрушения составило 633 757 циклов. После облучения – 1 523 825 циклов при флюенсе $2 \cdot 10^{15}$ см⁻² и 1 000 000 циклов при флюенсе $1 \cdot 10^{16}$ см⁻².

Данное явление может быть связано с тем, что в условиях многоциклового усталости имеют место малые упругие дефор-

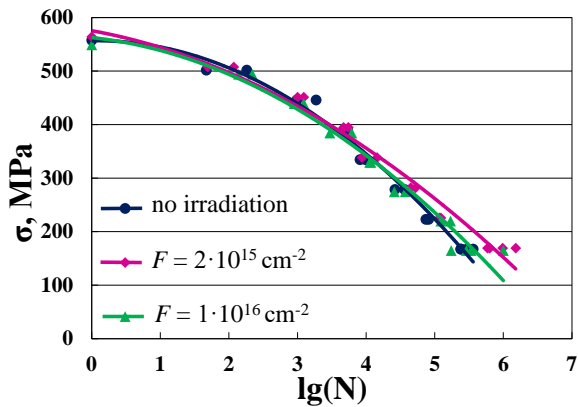


Рис. 1. Зависимость количества циклов $\lg(N)$ от максимального напряжения цикла σ для образцов сплава Д16 в исходном состоянии и после облучения ионами Ar^+ ($E = 20$ кэВ)

Fig. 1. Dependence of the cycles $\lg(N)$ number on the maximum cycle stress σ for the alloy D16 samples in the initial state and after irradiation with Ar^+ ions ($E = 20$ keV)

магии. Кроме того, поверхность и объем облученного образца подвергаются мгновенному (в течение нескольких секунд) радиационному отжигу пучком ионов [4], в результате чего как поверхность, так и объем практически освобождаются от деформационных дефектов. В силу этого разрушение начинается с поверхности образца гораздо позднее, поскольку значительно медленнее развиваются процессы накопления повреждений и трещинообразования. При малоциклового же усталости имеют место упругопластические деформации и дефекты накапливаются по всему сечению образца.

Заключение

Проведено исследование влияния облучения ионами Ar^+ с энергией 20 кэВ на сопротивление усталости горячепрессованных профилей толщиной 6 мм из сплава Д16 после закалки и естественного старения.

Установлено, что после облучения сплава Д16 флюенсами $2 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ cm^{-2} наблюдается существенное увеличение количества циклов до разрушения в условиях пониженных амплитуд нагрузки $\sigma/\sigma_B = 0.3$. Максимальное увеличение в 2.4

раза наблюдается при меньшем флюенсе ионов $F = 2 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} .

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ № 19-08-00802-а.

Библиографические ссылки

1. Гусева М.И. Технологические аспекты ионной имплантации в металлах. *Металлы* 1993; (3): 141-149.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. Москва: Издательский дом «Круглый год»; 2001. 528 с.
3. Bonora R, Cioff M.O.H., Voorwald H.J.C. Plasma immersion ion implantation on 15-5PH stainless steel: influence on fatigue strength and wear resistance. *Journal of Physics: Conf. Series* 2017; (843): 012023.
4. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. *Surface and Coating Technology* 2018; (355): 65-83
5. Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Nikulin S.P., Radkovskii G.V., Eklind A., Perry A.J. A New Broad Beam Gas Ion Source for Industrial Applications. *J. Vac. Sci. Technol.* 1996; (A 14): 1050-1056.

References

1. Guseva M.I. Tekhnologicheskie aspekty ionnoy implantatsii v metallakh [Technological aspects of ion implantation in metals]. *Metally* 1993; (3): 141-149. (In Russian).
2. Gribov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A., Yaku-shin V.L. Perspektivnye radiatsionno-puchkovye tekhnologii obrabotki materialov [Leading-edge radiation-beam technologies for material working]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Kruglyy god»; 2001. 528 p. (In Russian).
3. Bonora R, Cioff M.O.H., Voorwald H.J.C. Plasma immersion ion implantation on 15-5PH stainless steel: influence on fatigue strength and wear resistance. *Journal of Physics: Conf. Series* 2017; (843): 012023.
4. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. *Surface and Coating Technology* 2018; (355): 65-83.
5. Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Nikulin S.P., Radkovskii G.V., Eklind A., Perry A.J. A New Broad Beam Gas Ion Source for Industrial Applications. *J. Vac. Sci. Technol.* 1996; (A 14): 1050-1056.