

Воздействие ионного облучения на ресурсные характеристики сплава В95 (Al – Zn – Mg – Cu)

Н. В. Гущина, В. В. Овчинников, К. В. Шаломов, Д. И. Вичужанин

Изучено воздействие пучков ионов Ar^+ (энергия $E = 20$ кэВ, плотность ионного тока $j = 200$ мкА/см²) на сопротивление усталости образцов сплава В95 (Al – Zn – Mg – Cu) толщиной 6 мм, вырезанных из профилей в состоянии поставки: после горячего прессования и последующего искусственного старения. Установлено, что облучение ионами Ar^+ флюенсом $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² способствует увеличению сопротивления усталости сплава в 6,4 раза при уровне амплитуд нагрузки $\sigma/\sigma_b = 0,3$.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; облучение ионами; сопротивление усталости

DOI: 10.30791/1028-978X-2022-12-57-61

Введение

Ионно-лучевая модификация структуры и свойств металлических материалов рассматривается в последнее время как один из методов улучшения их механических, трибологических (трение, износ) и ряда других свойств [1 – 3]. В работах [4 – 6] рассмотрено влияние ионного облучения на ресурсные характеристики металлов и сплавов.

Отмечается [3], что ионное облучение конденсированных сред приводит к переплавлению тонких приповерхностных слоев металлов с последующей их кристаллизацией. Это связано с формированием в областях прохождения плотных каскадов атомных смещений наноразмерных зон ($r \sim 5 - 10$ нм) взрывного энерговыделения, содержащих от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч атомов, разогреваемых в течение триллионных долей секунды до 3000 – 6000 К (термических пиков, thermal spikes) и давлениями в этих областях, превышающими как реальный, так и теоретический предел текучести материалов. Этот эффект может приводить, в частности, к заживлению нано- и микротрещин. Помимо этого, внедряемые примеси вызывают появление сжимающих напряжений в поверхностных слоях материалов. В связи с этим можно ожидать изменения как механических, так и ресурсных характеристик материалов под воздействием ионного облучения.

Особую роль могут играть также дальнедействующие динамические эффекты, связанные с незатухающим распространением посткаскадных ударных и мощных упругих волн в метастабильных средах [3, 7].

Сплав В95 (Al – Zn – Mg – Cu) широко используется в машиностроении и поэтому является актуальным объектом для исследования.

Цель настоящей работы — изучение характера воздействия ионов Ar^+ на сопротивление усталости горячепрессованных профилей сплава В95 (Al – Zn – Mg – Cu) в состоянии поставки.

Материалы и методы исследования

Из горячепрессованных профилей ПР-100-23 (рис. 1) [8] из сплава В95 (Al – Zn – Mg – Cu) толщиной 6 мм, продукции Каменск-Уральского металлургического завода (ОАО “КУМЗ”), подвергнутых закалке и искусственному старению ($T = 140$ °С, 16 ч), были изготовлены стандартные образцы для усталостных испытаний [9].

Облучение образцов непрерывными пучками ускоренных ионов Ar^+ с энергией $E = 20$ кэВ при плотности ионного тока $j = 200$ мкА/см² проводили в Институте электрофизики УрО РАН на ионном имплантере ИЛМ-1, оснащённом ионным источником типа ПУЛЬСАР-1М с холодным полым катодом на основе тлеющего разряда низкого

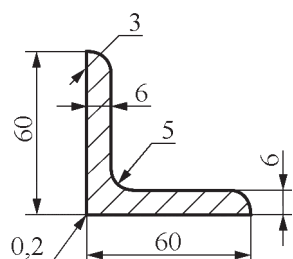


Рис. 1. Сечение профилей ПР100-23 из сплава В95 [8], подвергавшихся ионно-лучевой модификации. Размеры указаны в мм.

Fig. 1. Section of the PR 100-23 profiles from alloy V95 [8] subjected to ion-beam modification. The dimensions are given in mm.

давления [10, 11]. Из цилиндрического пучка ионов с помощью коллиматора вырезался ленточный пучок ионов $100 \times 20 \text{ мм}^2$. Образцы облучали последовательно с двух сторон флюенсами $2 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, соответствующее время облучения при этом составило 1,6 и 8 с. В ходе облучения образцы перемещали относительно ленточного пучка ионов со скоростью 2,5 см/с. Это позволило не нагревать мишени ходе облучения выше $40 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Контроль температуры образцов для усталостных испытаний осуществляли с помощью хромель-алюмелевой термопары, приваренной к облучаемому одновременно идентичному образцу-свидетелю. Термопара соединена с системой анализа цифровых сигналов на базе модулей ADAM-4000.

Испытания ресурсных характеристик образцов были проведены в Институте машиноведения УрО РАН на сервогидравлической испытательной установке INSTRON 8801, которая снабжена ЭВМ и контроллером FastTrack. Все операции в процессе эксперимента регламентировались программно-аппаратными средствами. Кривые усталости Веллера были определены в ходе циклических испытаний по синусоидальному циклу с частотой нагружения 3 Гц. Коэффициент несимметрии цикла равен -1 .

Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены кривые Веллера, полученные по результатам испытаний исходных и облученных образцов сплава В95. Видно, что образцы, облученные ионами Ar^+ флюенсом $F = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, ведут себя примерно одинаково с исходными образцами, не подвергавшимся облучению. Увеличение флюенса до $F = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к значительному росту (в 6,4 раза) количества

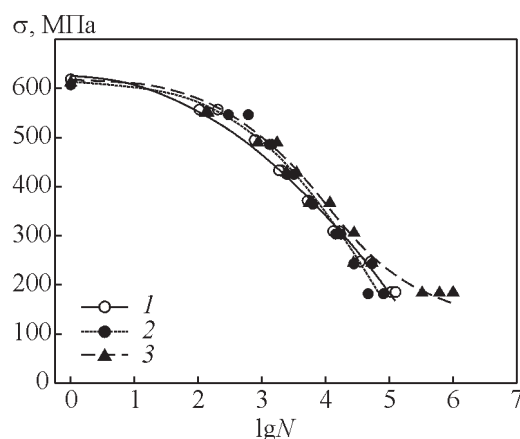


Рис. 2. Зависимость количества циклов $\lg(N)$ от максимального напряжения цикла σ для образцов сплава В95 в исходном состоянии (1) и после облучения ионами Ar^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$) флюенсами $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) и $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3).

Fig. 2. Dependence of the cycles $\lg(N)$ number on the maximum cycle stress σ for the alloy V95 samples in the initial state (1) and after irradiation with Ar^+ ions ($E = 20 \text{ keV}$) with fluences of $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) and $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3).

циклов до разрушения. Облученные образцы выдержали в среднем (по результатам испытания четырех образцов) 749 580 циклов до разрушения в условиях пониженных амплитуд нагрузки $\sigma/\sigma_b = 0,3$, тогда как в исходном состоянии без облучения — только 116 530 циклов.

Ранее в работе [12] нами были получены аналогичные результаты для профилей сплава Д16 ($\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mg}$) после закалки и естественного старения. Максимальное увеличение сопротивления усталости в 2,4 раза образцов сплава Д16 удалось получить при облучении ионами Ar^+ с энергией 20 кэВ меньшим, чем для сплава В95, флюенсом — $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что наличие оптимальных значений флюенсов в области малых экспозиций является характерным для радиационно-динамических воздействий [3, 7]. Пошаговое точное изменение малых доз может осуществляться при помощи специальных экспозиционных дифрагм.

Установленное явление существенного увеличения сопротивления усталости облученных образцов в условиях $\sigma/\sigma_b = 0,3$ может быть связано со следующими причинами. Как уже было отмечено в [12], в условиях многоциклового усталости имеют место малые упругие деформации, и разрушение начинается с поверхности образца. В случае малоциклового усталости, напротив, имеют место упругопластические деформации, и дефекты на-

капливаются по всему сечению образца [13]. В ходе ионного облучения с учетом имеющего место переплавления тонких приповерхностных слоев сплавов Д16 и В95 термическими пиками может происходить залечивание различного типа поверхностных дефектов. Поверхность и близлежащий к поверхности объем образцов могут освободиться от дефектов и по причине мгновенного (в течение нескольких секунд) радиационного отжига [3]. При этом процессы накопления повреждений и трещинообразования будут происходить медленнее, и разрушение с поверхности образца может начинаться гораздо позднее.

В целях более детального объяснения наблюдаемых эффектов повышения усталостной прочности сплава В95 в результате ионного облучения авторы в дальнейшем планируют провести структурные исследования этого сплава методом ПЭМ в исходном и облученном состояниях.

Выводы

Установлено, что после облучения (Ar^+ , $E = 20$ кэВ, $j = 200$ мкА/см², $F = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻²) горячепрессованных профилей из высокопрочного сплава В95 системы Al – Zn – Mg – Cu в состоянии поставки: после закалки и искусственного старения (140 °С, 16 ч), наблюдается существенное увеличение (в 6,4 раза) сопротивления усталости в условиях пониженных амплитуд нагрузки $\sigma/\sigma_b = 0,3$.

Полученные данные свидетельствуют о том, что ионно-лучевую обработку промышленных алюминиевых сплавов ионами аргона можно применять не только в качестве промежуточной обработки в ходе холодной прокатки таких сплавов [14], но и на финальных стадиях обработки для улучшения их ресурсных характеристик.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 122011200363-9). Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП “Пластометрия” ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Гусева М.И. Технологические аспекты ионной имплантации в металлах. Металлы, 1993, № 3, с. 141 – 149.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. Москва, Издательский дом “Круглый год”, 2001, 528 с.

3. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. Surface and Coating Technology, 2018, v. 355, pp. 65 – 83.
4. Shulov V.A., Nochovnaya N.A. Fatigue strength of metals and alloys modified by ion beams. Surface and Coatings Technology, 2002, v. 158 – 159, pp. 33 – 41.
5. Быков П.В., Гильмутдинов Ф.З., Волков В.А., Колотод А.А., Баянкин В.Я. Влияние ионной имплантации на усталостную прочность титанового сплава ОТ4. Материаловедение, 2003, № 11, с. 30 – 34.
6. 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, v. 843, art. 012023.
7. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I. Restoration of plasticity of cold-deformed aluminium alloy by short-term irradiation with accelerated Ar^+ ions. Surface and Coatings Technology, 2020, v. 389, art. 125504.
8. ГОСТ 13737-90. Профили прессованные прямоугольные равнополочного уголкового сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент. Москва, Издательство стандартов, 1993.
9. ГОСТ 25.502-79 Методы испытаний на усталость образцов металлов. Москва, Издательство стандартов, 1985.
10. 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. A, 1996, v. 14, p. 1050 – 1056.
11. Гаврилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В. Источник интенсивных широких пучков ионов газов на основе разряда с полым катодом в магнитном поле. Приборы и техника эксперимента, 1996, № 1, с. 93 – 98.
12. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Шаломов К.В., Вичужанин Д.И. Влияние ионного облучения на усталость прессованных профилей сплава системы Al – Cu – Mg. Материалы 14-й Международной конференции “Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ – 2021)”, Минск, 21 – 24 сентября 2021 г., Минск, Изд. БГУ, 2021, с. 274 – 276.
13. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов. Новосибирск, Изд. НГТУ, 2001, 61 с.
14. Овчинников В.В., Гаврилов Н.В., Гущина Н.В., Школьников А.Р., Можаровский С.М., Филиппов А.В. Способ получения листового проката из алюминиевых сплавов. Патент РФ № 2363755. Заявл. 08.12.2006. Опубл. 10.08.2009. Бюл. № 22.

References

1. Guseva M.I. Tekhnologicheskie aspekty ionnoy implantatsii v metallakh [Technological aspects of ion implantation in metals]. Metally [Metally], 1993, no. 3, pp. 141 – 149. (In Russ.).
2. Gribov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A., Yakushin V.L. Perspektivnye radiatsionno-puchkovye tekhnologii

- obrabotki materialov [Leading-edge radiation-beam technologies for material working], Moscow, "Kruglyy god", 2001, 528 p. (In Russ.).
3. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. *Surface and Coating Technology*, 2018, v. 355, pp. 65 – 83.
 4. Shulov V.A., Nochovnaya N.A. Fatigue strength of metals and alloys modified by ion beams. *Surface and Coatings Technology*, 2002, v. 158 – 159, pp. 33 – 41.
 5. Bykov P.V., Gilmutdinov F.Z., Volkov V.A., Kolotov A.A., Bayankin V.Y. Vliyanie ionnoj implantatsii na ustalostnyuyu prochnost' titanovogo splava OT4 [Effect of ion implantation on the fatigue strength of titanium alloy OT4]. *Materialovedenie [Materials Science]*, 2003, no. 11, pp. 30 – 34. (In Russ.).
 6. 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, v. 843, art. 012023.
 7. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I. Restoration of plasticity of cold-deformed aluminium alloy by short-term irradiation with accelerated Ar⁺ ions. *Surface and Coatings Technology*, 2020, v. 389, art. 125504.
 8. GOST 13737-90. Profili pressovannye pryamougol'nye ravnopolochnogo ugolkovogo secheniya iz alyuminievyh i magnievyh spлавov. *Sortament. [Extruded rectangular profiles with equal angular section from aluminum and magnesium alloys. Range]*, Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1993. (In Russ.).
 9. GOST 25.502-79 Metody ispytaniy na ustalost' obrazcov metallov. [Methods of fatigue testing of metal samples]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1985. (In Russ.).
 10. 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, v. A 14, pp. 1050 – 1056.
 11. Gavrilov N.V., Nikulin S.P., Radkovskii G.V. Istochnik intensivnyh shirokih puchkov ionov gazov na osnove razryada s polym katodom v magnitnom pole. [A source of intense wide beams of gas ions based on a discharge with a hollow cathode in a magnetic field]. *Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental techniques]*, 1996, no. 1, pp. 93 – 98. (In Russ.).
 12. Ovchinnikov V.V., Gushchina N.V., Shalomov K.V., Vichuzhanin D. I. Vliyanie ionnogo oblucheniya na ustalost' pressovannykh profilej splava sistemy Al-Cu-Mg [Effect of ion irradiation on fatigue of pressed alloy profiles of the Al-Cu-Mg system]. *Materialy 14-j Mezhdunarodnoj konferencii "Vzaimodejstvie izlucheniya s tverдыm telom (VITT – 2021)"* Minsk, 21 – 24 sentyabrya 2021 g. [Proceedings of the 14th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", Minsk, September 21 – 24, 2021]. Minsk, BGU, 2021, pp. 274 – 276. (In Russ.).
 13. Terentyev V.F., Oxogoev A.A. *Ciklicheskaya prochnost' metallicheskih materialov: Ucheb. posobie. [Cyclic strength of metallic materials: Study guide]*, Novosibirsk, NGTU, 2001, 61 p. (In Russ.).
 14. Ovchinnikov V.V., Gavrilov N.V., Gushchina N.V., Shkolnikov A.R., Mozharovsky S.M., Filippov A.V. Sposob polucheniya listovogo prokata iz alyuminievykh spлавov [Method for producing sheet metal from aluminum alloys]. Patent of the RF no 2363755. Declared 08.12.2006. Published 10.08.2009. Bulletin no. 22.

*Статья поступила в редакцию — 11.05.2022 г.
после доработки — 07.06.2022 г.
принята к публикации — 08.06.2022 г.*

Гущина Наталья Викторовна — Институт электрофизики УрО РАН (620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области исследования металлических сплавов после воздействия ионного облучения. E-mail: guschina@ier.uran.ru, guscha@rambler.ru.

Овчинников Владимир Владимирович — Институт электрофизики УрО РАН (620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, специалист в области физики металлов и сплавов и физики воздействия пучков заряженных частиц на вещество. E-mail: vladimir@ier.uran.ru; viae05@rambler.ru.

Шаломов Константин Владиславович — Институт электрофизики УрО РАН (620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106), младший научный сотрудник, специалист в области ионно-лучевой обработки металлов и сплавов. E-mail: icsartf@gmail.com.

Вичужанин Дмитрий Иванович — Институт машиноведения УрО РАН (620016, Екатеринбург, ул. Комсомольская 34), старший научный сотрудник, специалист в области механики деформированного твердого тела, механики поврежденности, а также в области исследования механических свойств металлов и сплавов. E-mail: mmm@imach.uran.ru.

Effect of ion irradiation on the resource characteristics of alloy V95 (Al – Zn – Mg – Cu)

N. V. Gushchina, V. V. Ovchinnikov, K.V. Shalomov, D. I. Vichuzhanin

The study of the effect of irradiation with Ar⁺ ions with an energy of 20 keV, ion current density $j = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ on the fatigue resistance of profiles 6 mm thick made of alloy V95 (Al – Zn – Mg – Cu) in the state of delivery: after hot pressing, quenching and artificial aging, has been carried out. It was found that irradiation with Ar⁺ ions fluence of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ to an increase fatigue resistance in 6.4 times under conditions of reduced load amplitudes $\sigma/\sigma_u = 0.3$.

Keywords: aluminum alloy; ion irradiation; fatigue resistance.

Gushchina Natalia — Institute of Electrophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Amundsena Street 106, Yekaterinburg, 620016, Russia), PhD (Phys-Math), Senior Researcher, specialist in the field of research of metal alloys after exposure to ion irradiation. E-mail: guschina@iep.uran.ru, guscha@rambler.ru.

Ovchinnikov Vladimir — Institute of Electrophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Amundsena Street 106, Yekaterinburg, 620016, Russia), Doctor of Sciences (Phys- Math), Professor, Chief Researcher, specialist in the field of physics of metals and alloys and physics of the effect of charged particle beams on matter. E-mail: vladimir@iep.uran.ru; viae05@rambler.ru.

Shalomov Konstantin — Institute of Electrophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Amundsena Street 106, Yekaterinburg, 620016, Russia), Junior Researcher, specialist in the field of ion-beam treatment of metals and alloys. E-mail: icsartf@gmail.com.

Vichuzhanin Dmitriy — Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolskaya Street 34, Yekaterinburg, 620049, Russia), PhD (Tech), Senior Researcher, specialist in the field of solid mechanics, damage mechanics and studying of mechanical properties of metals and alloys. E-mail: mmm@imach.uran.ru.