

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА Fe-15Cr-35Ni-11W, ОБЛУЧЕННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В.Г. Малынкин, Е.В. Платонова*

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ,
249049, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

** АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Под воздействием ионно-плазменной обработки радиационно-индуцированные структурно-фазовые превращения в высоколегированном жаропрочном сплаве Fe-15Cr-35Ni-11W отличаются от превращений в широко используемых в атомной энергетике сталях типа 0X18H10T и 0X16H15M3B. Эти отличия были установлены с помощью рентгенографического анализа, который показал, что дополнительные рефлексы на рентгенограммах облученных образцов сплава Fe-15Cr-35Ni-11W появляются со стороны больших углов относительно рефлексов исходного твердого раствора. Детальные рентгенографические исследования, проведенные авторами, показали, что на рентгенограммах железохромовых сплавов типа 0X18(10-30)H, легированных Ti, Mo, Nb, Al в количестве 1 – 3% и облученных ионно-плазменными потоками, дополнительные пики появлялись со стороны меньших углов.

В обоих случаях образовавшаяся фаза является изоморфной матричной и термически метастабильной, при этом в отличие от стали 0X18H10T сплав Fe-15Cr-35Ni-11W претерпевает разупрочнение. Методом рентгенографического анализа определены концентрации дефектов упаковки в сплаве Fe-15Cr-35Ni-11W и стали 0X18H10T в деформированном состоянии. Установлено, что концентрация дефектов упаковки в таком состоянии в стали 0X18H10T в четыре раза выше, что свидетельствует о более низкой энергии дефекта упаковки в этой стали. Сделан вывод о том, что наблюдаемые эффекты связаны с механизмом радиационно-индуцированной пластической деформации. Структурно-фазовые изменения в сплаве Fe-15Cr-35Ni-11W связаны с деформацией двойникованием в отличие от стали 0X18H10T, в которой наблюдаемые превращения обусловлены деформацией скольжением.

Ключевые слова: ионно-плазменная обработка, аустенитные нержавеющие стали, рентгеновская дифракция, дефекты упаковки, деформация скольжением, деформация двойникованием.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленных реакторных материалах в поликристаллическом и монокристаллическом состояниях под воздействием непрерывных ионно-плазменных потоков ионов с энергией от десятков килоэлектронвольт до 1 МэВ происходят существенные структурно-фазовые изменения [1 – 23]. Типичные изменения рентгеновской дифракционной картины в облученных сплавах приведены на рис. 1. В сплавах Fe-18Cr-10Ni и Fe-16Cr-15Ni с небольшими добавками Ti, Nb или Mo, имеющих гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК), эти изменения проявлялись в появлении дополнительных рентгеновских рефлексов со стороны малых углов от основных линий матричного твердого раствора. Для материалов составов Fe-12Cr-Mo-V-Nb, Fe-(18-24Cr), имеющих объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК), исходная рентгеновская линия приобретала уширение.

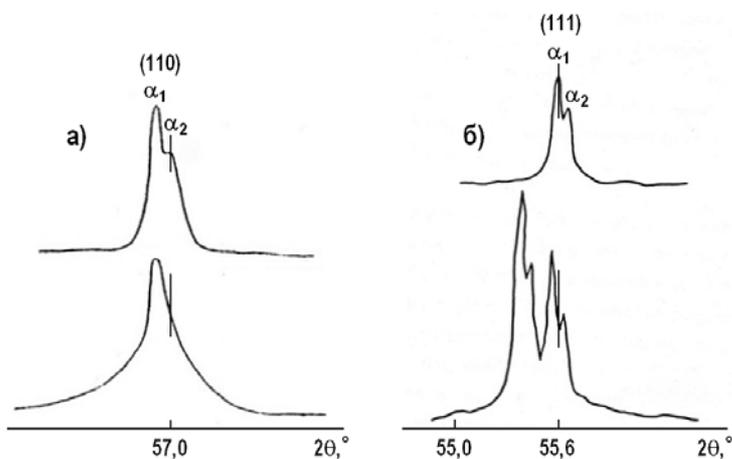


Рис. 1. Рентгеновская дифракционная картина сталей ОЦК Fe-12Cr-Mo-V-Nb (а) и ГЦК Fe-16Cr-15Ni-3Mo-Nb (б); исходная картина – вверху, после ионно-плазменной обработки – внизу

Такие изменения сопровождалось увеличением микротвердости, причем в материалах с ОЦК-решеткой в три – четыре раза больше, чем с ГЦК-решеткой.

В работе [25] высказано предположение о том, что радиационное влияние от ионных пучков, в основном, связано с пластической деформацией в приповерхностном объеме материалов. Такие деформации происходят в стесненных условиях и связаны с образованием и эволюцией не одномерных (дислокаций), а двумерных дефектов кристаллической структуры (дефектов упаковки, двойников и т.д.). Механизм деформации зависит от типа дефектов – носителей пластичности, который определяется энергией дефекта упаковки. Так, изменения линии (111) на рентгеновской дифрактограмме ГЦК-сплава (см. рис. 1) необходимо связывать с высокой концентрацией образующихся в процессе пластической деформации дефектов упаковки. В работе проведено сопоставление структурных изменений под воздействием ионно-плазменных потоков сплавов одного структурного класса, в значительной степени отличающихся по составу и энергии дефекта упаковки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Жаропрочный сплав Fe-15Cr-35Ni-11W и сталь 0X18N10T относятся к аустенитному классу, но отличаются по вероятности образования дефектов упаковки при механической деформации. В результате обработки рентгенограмм сталей после механической деформации по известной методике [27, 28] было установлено, что в стали Fe-15Cr-35Ni-11W вероятность образования дефектов упаковки составля-

ет $\alpha = 8,3 \cdot 10^{-3}$, а в стали 0X18H10T – $\alpha = 2,5$. Можно предположить, что в сплаве Fe-15Cr-35Ni-11W, имеющем более низкую вероятность образования дефектов упаковки, деформация скольжением в значительной степени затруднена, и наиболее вероятно деформация двойникованием. Поэтому была предпринята попытка сравнить поведение под воздействием ионно-плазменной обработки сплава Fe-15Cr-35Ni-11W и стали 0X18H10T, полученных методом вакуумно-дугового переплава.

Перед облучением холоднодеформированные образцы отжигали в безмасляном вакууме 10^{-6} Па при 1000°C в течение часа для снятия искажений, обусловленных механической обработкой. После аустенизации проводился рентгенографический анализ, который показал, что в исходном состоянии сталь представляла собой гомогенный твердый раствор с ГЦК-решеткой. Образцы сплава Fe-15Cr-35Ni-11W обрабатывались ионами аргона ионно-плазменного пучка, плотность которого достигает 10^{19} ион/см²·с, с энергией до 5 кэВ в условиях давления в камере 10^{-1} Па при температурах $450 - 600^\circ\text{C}$. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре Дрон-2.0 с использованием монохроматического $\text{Cr-K}\alpha$ -излучения. Обработка полученных рентгенограмм производилась при помощи программы OUTSET.

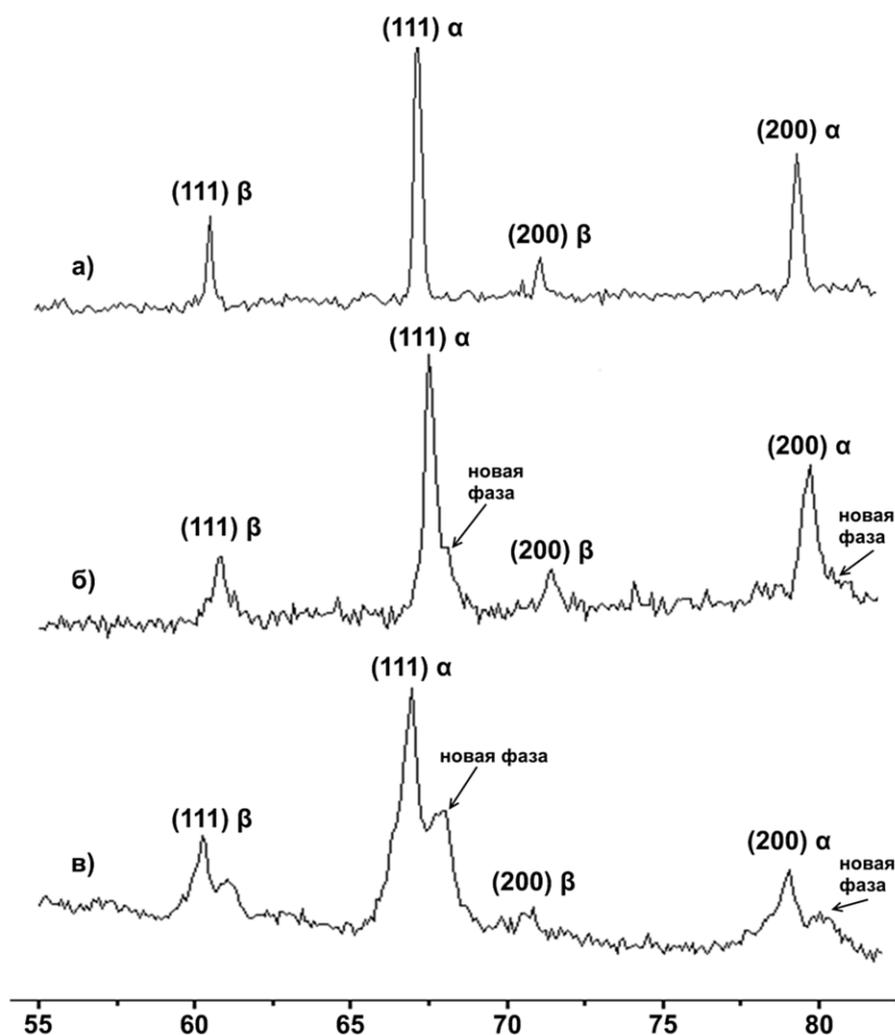


Рис. 2. Рентгенограммы Fe-15Cr-35Ni-11W в исходном состоянии (а), в облученном состоянии до дозы по аргону $D = 6,7 \cdot 10^{20}$ ион/см² (б), в облученном состоянии до дозы по аргону $D = 9 \cdot 10^{20}$ ион/см² (в)

На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы стали Fe-15Cr-35Ni-11W исходной и облученной ионно-плазменными потоками. После облучения появились дополнительные рентгенографические пики со стороны больших углов. Дополнительные пики появляются только вблизи линий исходного твердого раствора, что однозначно свидетельствует о том, что новая фаза имеет такую же, как и исходный сплав, ГЦК-структуру, но меньший период кристаллической решетки. Период кристаллической решетки новой фазы Fe-15Cr-35Ni-11W отличается от исходного значения $a = 3,5843 \cdot 10^{-8}$ см и уменьшается до $a = 3,5547 \cdot 10^{-8}$ см (доза по аргону $D = 6,7 \cdot 10^{20}$ ион/см²) и $a = 3,5619 \cdot 10^{-8}$ см (доза по аргону $D = 9 \cdot 10^{20}$ ион/см²).

Анализ интенсивностей исходных и новых линий указывает на то, что объемные фракции новой фазы составляют примерно 20 – 30% от исходной. Можно полагать, что в жаропрочной стали Fe-15Cr-35Ni-11W, которая имеет высокий предел текучести и большую энергию дефекта упаковки, стесненная радиационно-индуцированная пластическая деформация происходит по механизму двойникования с образованием изоморфной фазы. В этом случае, согласно работе [27], в результате деформации при высоких скалывающих напряжениях возникает изоморфная фаза.

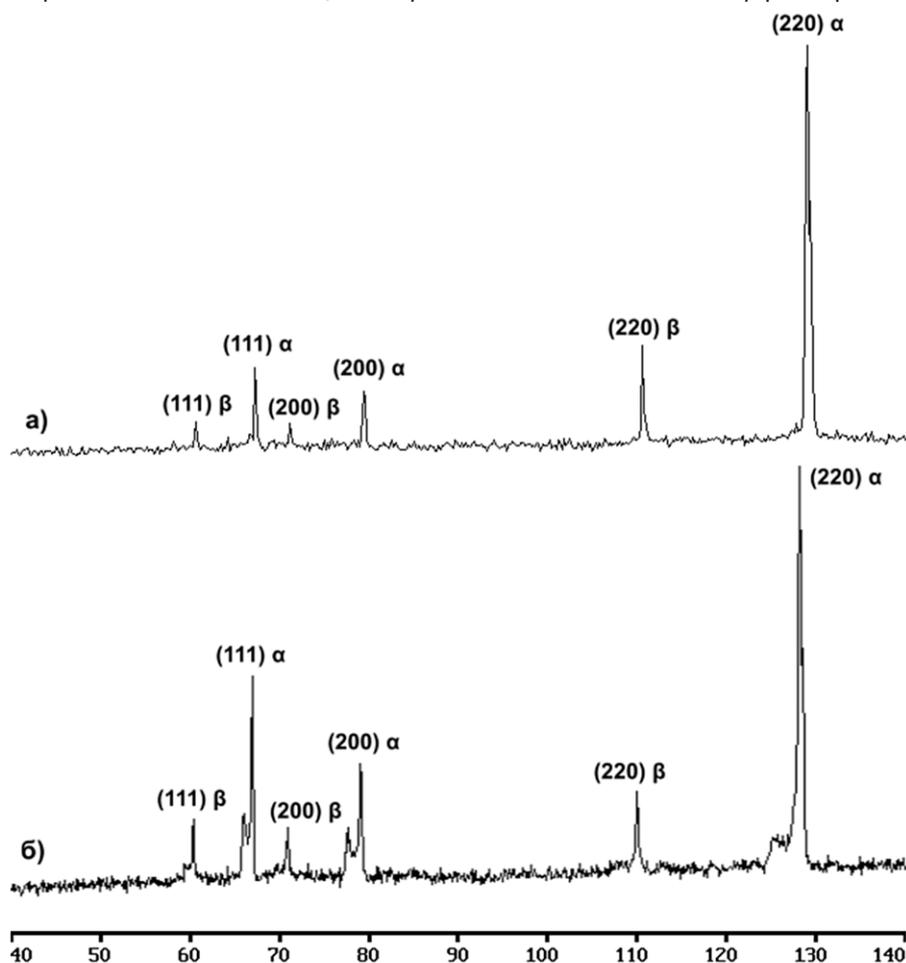


Рис. 3. Рентгенограмма исходного образца стали 0X18H10T (а) и облученного до дозы по аргону $D = 9 \cdot 10^{20}$ ион/см² (б)

На рисунке 3 представлены типичные изменения рентгеновской дифракционной картины аустенитной стали 0X18H10T с низким значением энергии дефекта упаковки в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки ионами аргона.

На рентгенограммах облученного образца видно, что образуются дополнительные пики со стороны малых углов от основных рефлексов. Новая фаза изоморфна исходной, но имеет больший период кристаллической решетки. В стали аустенитного класса с низкой энергией дефектов упаковки структурные изменения также связаны с пластической деформацией, но по механизму образования дефектов упаковки с появлением изоморфных фаз с большим периодом решетки.

Образец сплава Fe-15Cr-35Ni-11W после ионно-плазменной обработки Ar⁺ ($E = 3,5$ кэВ, $T_{обл.} = 500^{\circ}\text{C}$) подвергли пострадиационным отжигам при температурах 500, 600 и 700°C. Как видно из рис. 4, появившаяся изоморфная фаза является метастабильной, и существует температура фазовой релаксации, при которой образовавшаяся фаза исчезает.

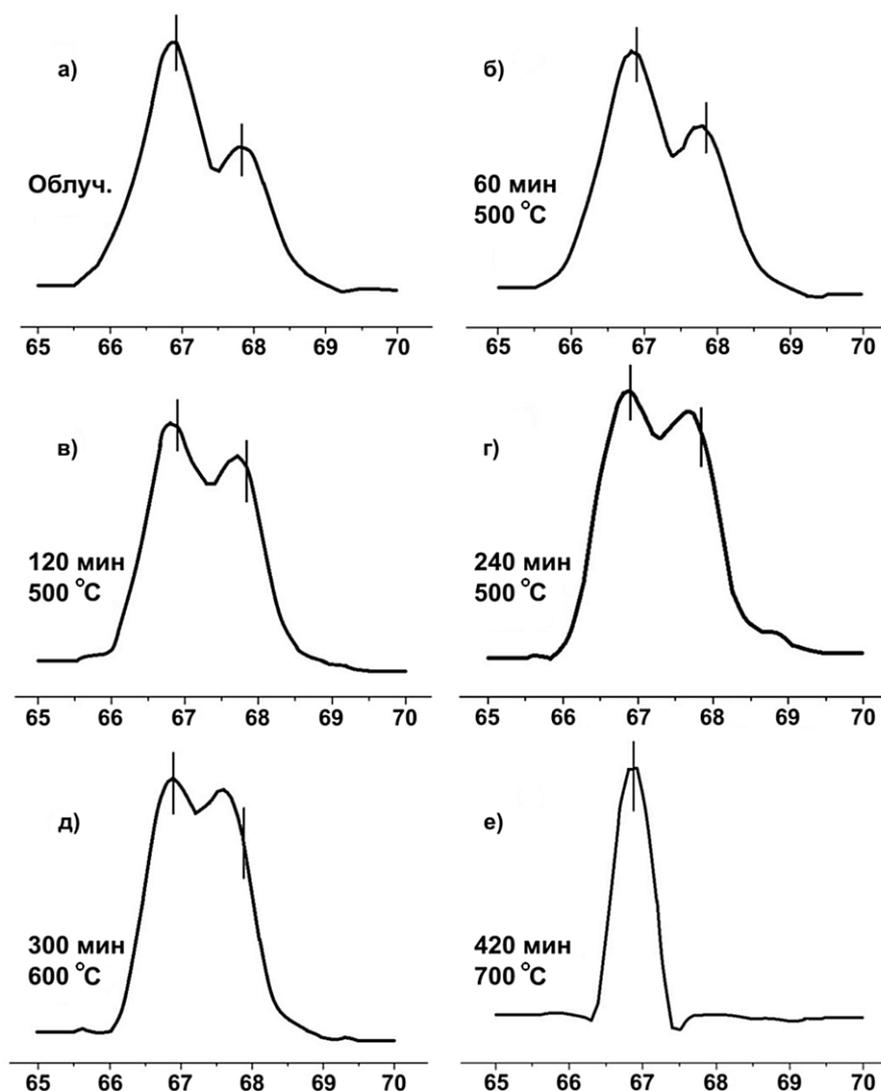


Рис. 4. Изменение формы рентгеновской дифракционной линии (111) образца Fe-15Cr-35Ni-11W, подвергнутого ионно-плазменной обработке Ar⁺ с энергией 3,5 кэВ при температуре 500°C (а) и отожженного при 500°C (б, в, г), 600°C (д), 700°C (е)

Измерения микротвердости показали, что после ионно-плазменной обработки микротвердость сплава Fe-15Cr-35Ni-11W снизилась с 2160 до 1090 МПа. Можно

предположить, что при появлении новой фазы с уменьшенным периодом решетки в локальных объемах исходной матрицы возникают области растяжения, что и приводит к уменьшению микротвердости. Напротив, после ионно-плазменной обработки микротвердость стали 0X18H10T увеличивается в два – три раза. Это связано с появлением новой фазы с большим периодом решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в результате ионно-плазменной обработки характер структурных изменений в аустенитных сталях зависит от величины энергии дефекта упаковки. В аустенитном сплаве Fe-15Cr-35Ni-11W с большой энергией дефекта упаковки радиационно-индуцированная пластическая деформация происходит по механизму двойникования. Это проявляется в появлении дополнительных рефлексов на рентгенограммах со стороны больших углов. Одновременно с этим происходит разупрочнение сплава. Такое поведение отличается от поведения сталей аустенитного класса с низкой энергией дефектов упаковки, исследованных ранее (0X18H10T и 0X16H15M3B), в которых индуцированные ионно-плазменной обработкой структурные изменения также связаны с пластической деформацией, но по механизму образования дефектов упаковки. Это проявляется в появлении дополнительных рефлексов на рентгенограммах со стороны меньших углов. При этом происходит увеличение микротвердости сплавов.

Литература

1. Гусева М.И. Ионная имплантация в металлах // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1982. – № 4. – С. 27-30.
2. Быков В.Н, Малышкин В.Г., Хмелевская В.С. Эффект дальнего действия при ионном облучении // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1989. – № 3. – С. 45-52.
3. Мартыненко Ю.В. Эффекты дальнего действия при ионной имплантации. // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. – 1993. – Т. 7. – С. 82-112.
4. Кузнецов Г.В. Влияние ионной бомбардировки на структурные и фазовые превращения при химико-термической обработке в тлеющем разряде // Митом. – 1987. – № 11. – С. 21-27.
5. Хмелевская В.С., Соловьев С.П., Малышкин В.Г. Новое структурное состояние в металлических системах, индуцированное облучением. // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. – 1990. – Т. 2. – С. 151-193.
6. Тетельбаум Д.И., Пантелеев В.А., Азов А.Ю., Гуткин М.В. О едином подходе к интерпретации эффекта дальнего действия при облучении твердых тел заряженными частицами и фотонами светового диапазона. // Поверхность. Сер. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2000. – № 5. – С. 87-89.
7. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solovyev S.P. Radiation-induced decomposition of unsaturated face centered cubic solid solution. // Phase Transitions. – 1991. – Vol. 29. – PP. 157-166.
8. Khmelevskaya V.S., Solovyev S.P., Malynkin V.G. Nonequilibrium structures in irradiated metallic alloys // J. Nucl. Mater. – 1993. – Vol. 199. – PP. 214-220.
9. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. The Morphology Changes Caused by the Non-Equilibrium Transition in Irradiated Metallic Solid Solutions // Phys. stat. sol. (a) – 1996. – V. 156. – PP. 251-256.
10. Хмелевская В.С., Малышкин В.Г., Соловьев С.П., Ислам Н., Базалева К.О. Эффект дальнего действия в условиях радиационно-индуцированного кинетического фазового перехода // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22. – Вып. 5. – С. 9-13.
11. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solovyev S.P. Structural transition under high dose ion irradiation // J. Nucl. Mater. – 1996. – Vol. 233-237. – PP. 240-243.
12. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. Anomalous states in metallic alloys induced by irradiation // Phase Transactions. – 1997. – Vol. 60. – PP. 59-65.

13. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Кудря Е.В. Особенности радиационно-индуцированного расслоения в твердых растворах с ГЦК-структурой // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1989. – Т. 50. – Вып. 3. – С. 58-61.
14. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г. Модифицирование поверхности металлических материалов методом формирования неравновесных состояний, индуцированных радиационным облучением. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 3. – С. 42 - 46.
15. Малынкин В.Г., Хмелевская В.С., Соловьев С.П. Структурное состояние облученных твердых растворов на железохромоникелевой и железохромистой основах. / Сб. докл. IV Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 15-19 мая 1995). – Т. 3. – С. 289-302.
16. Хмелевская В.С., Соловьев С.П., Грабова Р.Б., Малынкин В.Г. Особенности радиационно-индуцированных превращений в хромистых сталях // ФММ. – 1990. – № 3. – С. 156-160.
17. Хмелевская В.С., Грабова Р.Б., Малынкин В.Г., Соловьев С.П. Аномальные изменения структуры и свойств хромистых сталей, облученных ионами. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1990. – № 8. – С. 126-132.
18. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Каширин С.И., Кудря Е.В. Морфология твердых растворов в области неравновесного фазового перехода, индуцированного облучением. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1991. – № 2. – С. 55-57.
19. Малынкин В.Г., Хмелевская В.С., Белоголовцев Г.И. Структурно-фазовые превращения в аустенитных и ферритно-мартенситных сталях при ионно-плазменном воздействии. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 3. – С. 74-79.
20. Кунченко Ю.В., Кунченко В.В., Картамазов Г.Н. О глубине зоны модификации (упрочнения) материалов облучением при $T \leq 100^\circ\text{C}$ низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда. // ФП ФИП, PSE. – 2009. – Т. 7. – № 1-2. – С. 46-53.
21. Глушко В.И., Бобков В.В., Рябчиков Д.Л., Цуканов В.В., Середа Н.Д. Зарождение и рост новообразований на поверхности металлов в тлеющем разряде аргона. // Известия академии наук. Сер. Физическая. – 1994. – Т. 58. – № 3. – С. 148-142.
22. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Канунников М.Ю. Превращения в электронной подсистеме металлических твердых растворов в области радиационно-индуцированного перехода. // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 24. – № 23. – С. 1-7.
23. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г. Диссипативные структуры в металлических материалах после облучения и других видах сильного воздействия. // Материаловедение. – 1988. – № 2. – С. 25-32.
24. Lindhard J., Scharff M., Shiott H.F. Range concepts and heavy ion-range. // Mat. Fys. Dan. Vid. Selsk. – 1963. – Vol. 33. – No. 14. – PP. 1-42.
25. Степанов В.А., Хмелевская В.С. Радиационно-индуцированная пластическая деформация и «эффект дальнего действия». // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – № 9. – С. 52-56.
26. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. II. Деформация. Учебник для вузов. – М.: МИСиС, 1997. – 527 с.
27. Вышняков Я.Д. Дефекты упаковки в кристаллической структуре. – М.: Металлургия, 1970. – 216 с.
28. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Быков В.Н., Желтов Ю.В., Иванов А.Н. Влияние энергии дефектов упаковки на процессы, происходящие в материалах при облучении. // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1988. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 25-36.

Поступила в редакцию 14.09.2016 г.

Авторы

Малынкин Вадим Григорьевич, доцент ИАТЭ НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н.

E-mail: malynkin@iate.obninsk.ru

Платонова Евгения Витальевна, инженер АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

E-mail: dem1@mail.ru

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL CONDITION OF
FE-15CR-35NI-11W STEEL IN IRRADIATED ION-PLASMA FLOWS**Malynkin V.G., Platonova E.V.*

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249049 Russia

* JSC «SSC RF-IPPE n.a. A. I. Leipunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

It was found that under the influence of ion-plasma treatment radiation-induced structural-phase transformations in the high-alloy superalloy Fe-15Cr-35Ni-11W differ from the transformations in steels of the type 0X18H10T and 0X16N15M3B, widely used in nuclear power engineering. These differences were established with the help of X-ray analysis, which showed that additional reflections on the X-ray patterns of irradiated samples of the Fe-15Cr-35Ni-11W alloy appear from the side of large angles relative to the reflections of the initial solid solution. At the same time, detailed X-ray diffraction studies carried out by the authors earlier showed that X-ray diffraction patterns of iron-chromium alloys of the type 0X18 (10-30) H, additionally doped Ti, Mo, Nb, Al in an amount of 1–3% and irradiated with ion-plasma The additional peaks appeared from the side of smaller angles.

It is established that in both cases the formed phase is isomorphic to the matrix phase and is thermally metastable, and unlike the 0X18H10T steel, the Fe-15Cr-35Ni-11W alloy undergoes softening. The analysis of literature data on the causes capable of causing similar structural-phase transformations in materials subjected to intensive ion-plasma treatment is analyzed. The concentration of package defects in the alloy Fe-15Cr-35Ni-11W and the steel 0X18H10T in the deformed state was determined by the X-ray diffraction analysis. It was found that the concentration of packing defects in this state in steel 0X18H10T is 4 times higher, which indicates a lower packing defect energy Steel 0X18H10T. It is concluded that the observed effects are associated with the mechanism of radiation-induced plastic deformation. In the Fe-15Cr-35Ni-11W alloy, structural-phase changes are associated with deformation by twinning, in contrast to 0X18H10T steel, in which the observed transformations are due to slip deformation.

Key words: ion-plasma treatment, austenitic stainless steel, X-ray diffraction-pattern, stacking faults, slip deformation, twinning deformation.

REFERENCES

1. Guseva M.I. Ion implantation in metals. *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika*. 1982, no. 4, pp. 27-30 (in Russian).
2. Bykov V.N., Malynkin V.G., Khmelevskaya V.S. The effect of long-range under ion irradiation. *VANT. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie*. 1989, no. 3, pp. 45-52 (in Russian).
3. Martynenko Yu.V. Effects of long-range action in ion implantation. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Puchki zaryazhyonnykh chastits b ndyordoe telo*. 1993, v. 7, pp. 82-112 (in Russian).
4. Kuznetsov G.V. Influence of ion bombardment on structural and phase transformations during chemicothermal treatment in glow discharge. *MiTOM*. 1987, no. 11, p. 21-27 (in Russian).
5. Khmelevskaya V.S., Soloviev, S.P., Malynkin V.G. New structural state in metallic systems induced by irradiation. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Puchki zaryazhyonnykh chastits b*

ndyordoe telo. 1990, v. 2, pp. 151-193 (in Russian).

6. Tetelbaum, D.I., Panteleev V.A., Azov Y.A., Gutkin M. V. On a unified approach to the interpretation of the effect of the long-range irradiation of solids charged particles and photons of light band. *Poverkhnost'. Ser. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*. 2000, no. 5, pp. 87-89 (in Russian).

7. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solovyev S.P. Radiation-induced decomposition of unsaturated face centered cubic solid solution. *Phase Transitions*. 1991, v. 29, pp. 157-166.

8. Khmelevskaya V.S., Soloviev S.P., Malynkin V.G. Nonequilibrium structures in irradiated metallic alloys. *J. Nucl. Mater.* 1993, v. 199, pp. 214-220.

9. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. The Morphology Changes Caused by the Non-Equilibrium Transition in Irradiated Metallic Solid Solutions. *Phys. stat. sol. (a)* 1996, v. 156, pp. 251-256.

10. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Soloviev S.P., Islam N., Basalaeva K.O. The Effect of long-range in terms of radiation-induced kinetic phase transition. *Pis'ma v ZhTF*. 1996, v. 22, iss. 5, pp. 9-13 (in Russian).

11. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Soloviev S.P. Structural transition under high dose ion irradiation. *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 233-237, pp. 240-243.

12. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. Anomalous states in metallic alloys induced by irradiation. *Phase Transactions*. 1997, v. 60, pp. 59-65.

13. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Kudrya E.V. Peculiarities of radiation-induced separation in solid solutions with FCC-structure. *VANT. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie*. 1989, v. 50, no. 3, pp. 58-61 (in Russian).

14. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. Surface Modification of metallic materials by a method of forming a non-equilibrium States induced exposure to radiation. *Problemy mashinostroeniya i nadyozhnosti mashin*. 1994, no. 3, pp. 42 – 46 (in Russian).

15. Malynkin V.G., Khmelevskaya V.S., Soloviev, S.P. Structural state of irradiated solid solutions Fe-Ni and Fe-Cr basis. Proc. of IV-th Interindustry conference on reactor material science (Dimitrovgrad, 15-19 may 1995), v. 3, pp. 289-302 (in Russian).

16. Khmelevskaya V.S. Soloviev, S.P., Grabova R.B., Malynkin V.G. Characteristics of radiation induced transformations in chromium steels. *FMM*. 1990, no. 3, pp. 156-160 (in Russian).

17. Khmelevskaya V.S., Grabova, R.B., Malynkin V.G., Soloviev S.P. Abnormal changes of structure and properties of chromium steels irradiated with ions. *Poverkhnost'. Ser. Fizika, khimiya, mekhanika*. 1990, no. 8, pp. 126-132 (in Russian).

18. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Kashirin S.I., Kudrya E.V. Morphology of the solid solutions in the field of non-equilibrium phase transition induced by irradiation. *Poverkhnost'. Ser. Fizika, khimiya, mekhanika*. 1991, no. 2, p. 55-57 (in Russian).

19. Malynkin V.G., Khmelevskaya V.S., Belogolovtsev G.I. Structural-phase transformations in austenitic and ferritic-martensitic steels under ion-plasma exposure. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 1997, no. 3, pp. 74-79 (in Russian).

20. Kunchenko Y.V., Kunchenko V.V., Karamazov G.N. The depth of the zone modification (hardening) materials irradiation at $T \leq 100$ °C With low-energy glow discharge plasma. *FP of FIP, PSE*. 2009, v. 7, no. 1-2, pp. 46-53 (in Russian).

21. Glushko V.I., Bobkov V.V., Ryabchikov D.L., Tsukanov V.V., Sereda N.D. Nucleation and growth of novoobrazovany on the surface of metals in a glow discharge of argon. *Izvestiya akademii nauk. Ser. Fizicheskaya*. 1994, v. 58, no. 3, pp. 148-142 (in Russian).

22. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Kanunnikov M.J. The transformation of the electronic subsystem of the metal solid solutions in the field of radiation-induced transition. *Pis'ma v ZhTF*. 1988, v. 24, no. 23, pp. 1-7 (in Russian).

23. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G. Dissipative structures in the metal material after irradiation and other types of strong exposure. *Materialovedenie*. 1988, no. 2, pp. 25-32 (in Russian).
24. Lindhard J., Scharff M., Shiott H.F. Range concepts and heavy ion-range. *Mat. Fys. Dan. Vid. Selsk.* 1963, v. 33, no. 14, pp. 1-42.
25. Stepanov V.A., Khmelevskaya V.S. Radiation-induced plastic deformation and «the effect of long-range». *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2011, v. 81, no. 9, pp. 52-56 (in Russian).
26. Shtremel' M.A. Strength of Alloys: A Textbook for Institutes of Higher Education, Part 2: Deformation. Moscow. MISiS Publ., 1997, 527 p. (in Russian).
27. Vishnyakov J.D. Defects of packing in the crystal structure. Moscow. Metallurgiya Publ., 1970. 216 p. (in Russian).
28. Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Bykov V.N., Zheltov, Y.V., Ivanov A.N. The effect of the energy defects upakovki on the processes occurring in materials under irradiation. *VANT. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie*. 1988, v. 43, iss. 1, pp. 25-36 (in Russian).

Authors

Malynkin Vadim Grigoryevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail : malynkin@iate.obninsk.ru

Platonova Evgeniya Vital'yevna, Engineer

E-mail: dem1@mail.ru