

УДК 517

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ СТАРЕНИИ АРМКО-ЖЕЛЕЗА МЕТОДОМ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В. П. Алехин, В. И. Кошкин, Г. А. Сиротинина
Московский автомобилестроительный институт, Москва, Россия

А. А. Новакова
Московский государственный университет, Москва, Россия

Методом мессбауэровской спектроскопии исследованы структурные изменения в приповерхностных слоях армко-железа в процессе деформационного старения после упрочнения способом ультразвукового выглаживания. Показано, что при поверхностной упрочняющей обработке армко-железа в поверхностном слое толщиной не менее 20 мкм образуются области, в которых атомы ^{57}Fe имеют ближайшее окружение по типу аустенита. В результате последующего деформационного старения происходит диффузионное перераспределение углерода из объема материала в поверхностный слой с повышенной плотностью дислокаций.

Способность материала упрочняться в результате пластической деформации используется в различных методах поверхностной упрочняющей обработки (ПУО). Проведение ПУО приводит к увеличению плотности дислокаций и измельчению зерен в поверхностных слоях материалов. Наличие приповерхностного градиента повышенной плотности дислокаций и соответствующего поля внутренних остаточных напряжений является движущей силой, приводящей к образованию направленного диффузионного потока примесей внедрения из объемных внутренних слоев металла в его приповерхностные слои [1]. Осаждающиеся на дислокации быстродиффундирующие примеси внедрения (углерод, азот) приводят к более жесткому их закреплению, т. е. дополнительному упрочнению поверхностного слоя.

Ранее [2] были обнаружены особенности деформационного старения (ДС) в поверхностных слоях армко-железа и малоуглеродистых сталей после шлифования и полирования, проявляющиеся в увеличении микротвердости в два и более раз на глубине нескольких микрометров.

Известно [3], что процессы старения зависят от многих факторов: типа сплава, режимов термообработки, способа пластической деформации и др., т. е. существует возможность воздействия на кинетику процессов ДС. В связи с этим большой практический интерес представляет изучение процессов деформационного старения после различных видов упрочняющей обработки в целях изыскания резервов повышения прочностных характеристик материалов, прошедших ПУО, за счет целенаправленной интенсификации процессов ДС в поверхностных слоях.

В настоящей работе проведено исследование диффузионного перераспределения примесей внедрения в процессе деформационного старения армко-железа, упрочненного методом безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО).

БУФО — это поверхностная упрочняющая обработка, создающая наклеп в поверхностных слоях материалов, в результате чего улучшаются эксплуатационные свойства деталей: усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость [4, 5]. Особенностью БУФО по сравнению с другими методами ПУО является наложение на рабочую часть инструмента колебаний ультразвуковой частоты, т. е. кроме статической нагрузки на поверхность обрабатываемого ма-

териала действует еще динамическая нагрузка, периодически изменяющаяся во времени.

БУФО позволяет без применения дополнительного специализированного оборудования и по сокращенному технологическому маршруту повышать чистоту поверхности деталей до уровня, предъявляемого к финишной обработке. После обработки поверхности металла резцом и последующей ультразвуковой обработки на оптимальных режимах возможно получение 10—12 класса чистоты с $Ra = 0,03—0,1$ мкм, причем микронеровности имеют форму, близкую к образующейся после приработки (рис. 1).

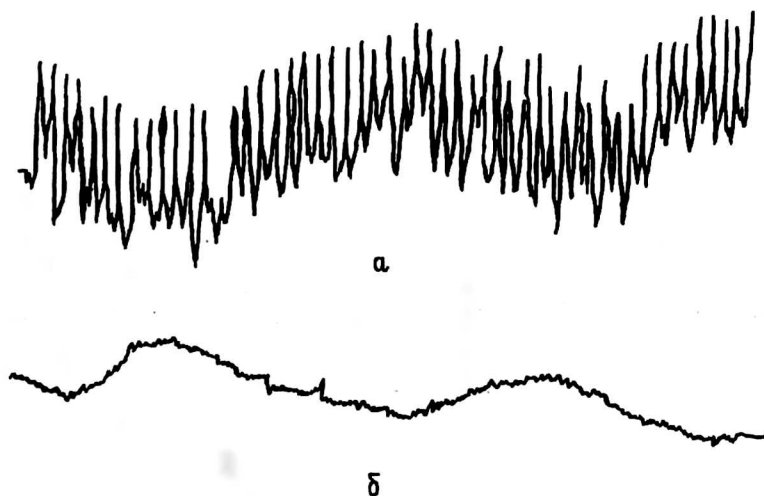


Рис. 1. Профилограммы поверхности детали из незакаленной стали 45:
а — после обработки резцом (увеличение 2000х20); б — после БУФО
(увеличение 10 000х20)

Толщина упрочненного слоя зависит от технологических параметров ультразвуковой обработки и исходной микротвердости материала и составляет для армко-железа ~ 200 мкм для оптимальных, с точки зрения качества поверхности, режимов обработки, а максимальное упрочнение при ДС происходит на глубине ~ 1 мкм [2].

Исследование проводили методом селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии [6]. Метод заключается в том, что с помощью плоского пропорционального детектора (ППД) в геометрии обратного рассеяния регистрируются резонансные конверсионные К-электроны в интервале энергий $E = 6,8—9,1$ кэВ или резонансное характеристическое рентгеновское излучение ($E = 6,4$ кэВ). В результате этих измерений при регистрации электронов получается мессбауэровский спектр с глубины от поверхности $\leq 0,1$ мкм, а при регистрации рентгеновского излучения — с глубины ~ 20 мкм. Для проведения таких измерений исследуемые образцы помещают в ППД, и поэтому их толщина должна быть ~ 1 мм.

Образцы вырезались из прутка армко-железа (0,007 вес. % С) диаметром 10 мм, после чего для снятия напряжений, возникших в результате предварительной обработки и снижения дефектности, образцы были отожжены в вакуумной печи (10^{-3} Па) в течение 2 ч при температуре 1050 °С. С образцов снимались мессбауэровские спектры с регистрацией конверсионных электронов и спектры с регистрацией характеристического рентгеновского излучения. В исходном образце в силу низкого содержания примесей и дефектов большинство резонансных ядер имеет идентичное ближайшее окружение, поэтому оба спектра, полученные

с исходного образца, подобны и представляют собой зеемановские секстеты со следующими параметрами: $H_{\text{эф}} = 333$ кЭ, $\Gamma = 0,25$ мм/с ($H_{\text{эф}} = 330$ кЭ соответствует α -Fe [7]). Большее значение эффективного поля, чем для чистого железа, объясняется тем, что в исходном образце растворено некоторое количество углерода. На рис. 2 приведен спектр, полученный с помощью детектирования конверсионных электронов.

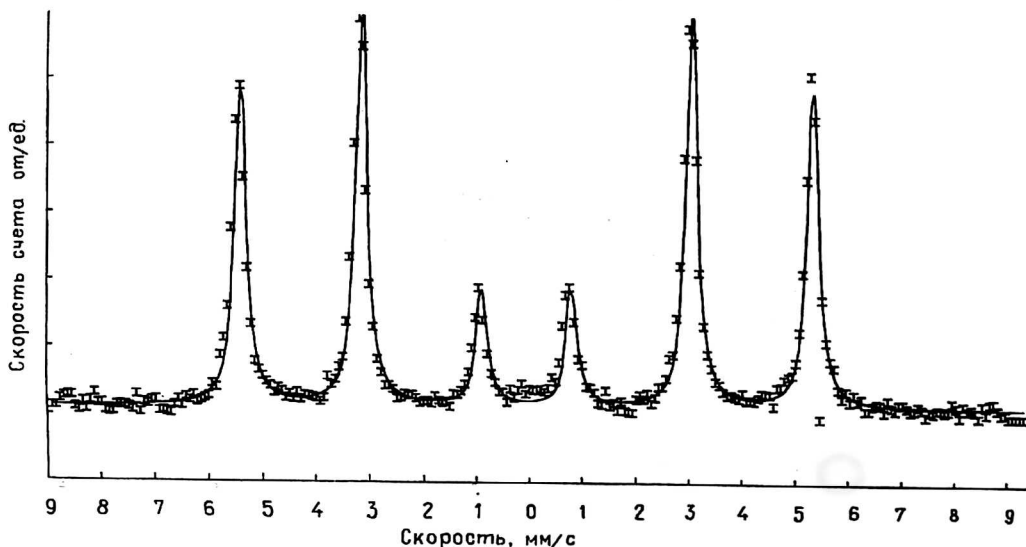


Рис. 2. Мессбауэровский спектр с поверхностного слоя исходного образца армко-железа (конверсионные электроны $\sim 0,1$ мкм)

Затем образец подвергали выглаживанию методом безабразивной ультразвуковой финишной обработки. Мессбауэровские спектры, снятые с глубин $\sim 0,1$ и ~ 20 мкм, практически не отличаются друг от друга.

Анализ этих спектров показал, что наряду с секстетом, соответствующим α -Fe, в них присутствует синглет, параметры которого соответствуют аустенитной фазе (изомерный сдвиг $\delta = -0,1$ мм/с). Следовательно, после ультразвукового упрочнения появляются области, в которых атомы ^{57}Fe имеют ближайшее окружение по типу аустенита. Вклад этих областей в спектры, снятые с обеих глубин, составляет $\sim 1,5$ ат. %. На рис. 3 приведен спектр с приповерхностного слоя $\sim 0,1$ мкм.

Небольшие изменения в спектрах выглаженного образца могут быть объяснены следующим образом. Дефекты, введенные в образец после упрочняющей обработки, изменяют энергию резонансных ядер. Возмущения электрических и магнитных полей, внесенные дефектами, убывают как $1/r^3$ (r — расстояние от дефекта) [8], поэтому наиболее сильное влияние оказывают несовершенства кристалла, расположенные вблизи поглощающего ядра. Но так как число резонансных ядер, имеющих дефекты в ближайшем окружении, мало, то происходит слабое изменение некоторых параметров спектра. Так, даже при высокой плотности дислокаций $\sim 10^{12}$ см $^{-2}$ и радиусе ядра дислокации $r_0 \sim 2b$ (b — вектор Бюргерса) число атомов железа в ядрах дислокаций не превышает 1 % общего их числа. Поэтому наблюдаемые в спектрах изменения незначительны.

Выглаженный образец состарился при температуре 100 °C в течение 20 ч. Микротвердость образца после искусственного старения оказалась на 50 % выше микротвердости исходного образца после упрочнения ультразвуковым выглажи-

ванием. Спектры, снятые с приповерхностных слоев состаренного образца, приведены на рис. 4 и 5. Математическая обработка показала, что они могут быть аппроксимированы суперпозицией трех секстетов с $H_{эф} = 312, 335-337$ и 342 кЭ и синглета с изомерным сдвигом $\delta = -0,1$ мм/с.

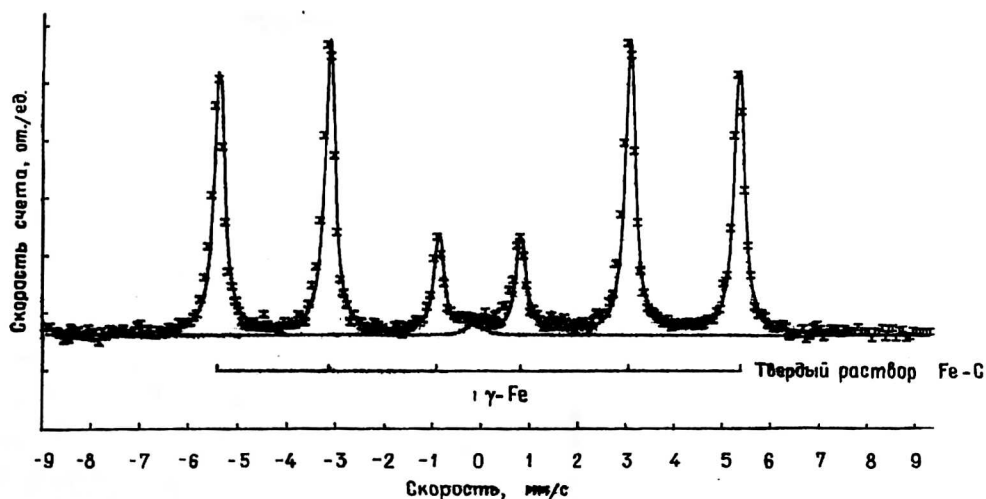


Рис. 3. Мессбауэровский спектр с поверхностного слоя образца армко-железа после БУФО (конверсионные электроны $\sim 0,1$ мкм)

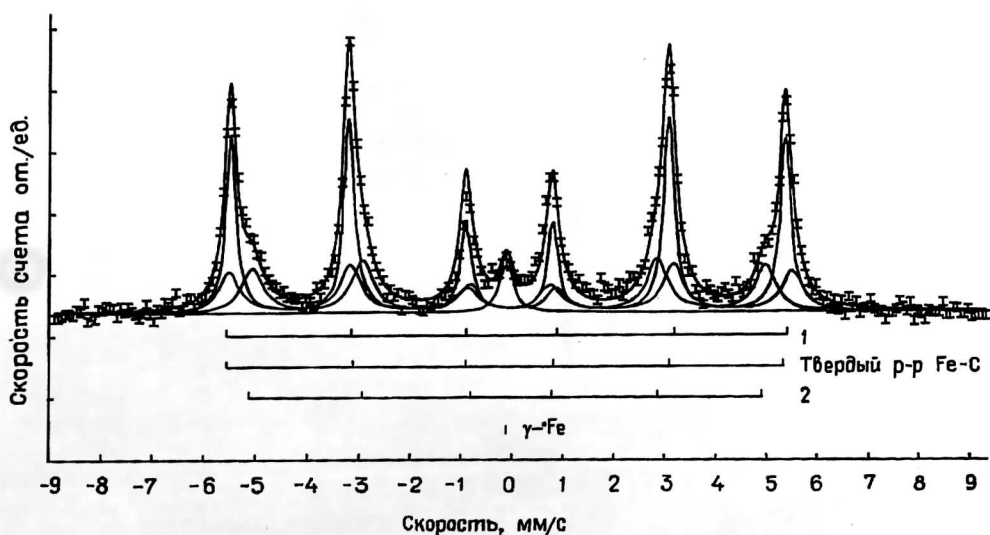


Рис. 4. Мессбауэровский спектр с поверхностного слоя образца армко-железа после БУФО и последующего старения при $T = 100^\circ\text{C}$ в течение 20 ч (конверсионные электроны $\sim 0,1$ мкм)

Относительные вклады подспектров в результирующий спектр, рассчитанные по их интенсивностям, приведены в таблице.

При искусственном старении выглаженного образца в результате увеличения температуры происходит рост диффузионной подвижности примесей внедрения, которые перераспределяются в полях напряжений дислокаций. В результате вокруг дислокаций образуются так называемые атмосферы Котрелла из растворенных атомов, которые способствуют торможению движения дислокаций и меняют

условия резонансного поглощения γ -квантов ядрами, что приводит к изменениям сверхтонких параметров спектра.

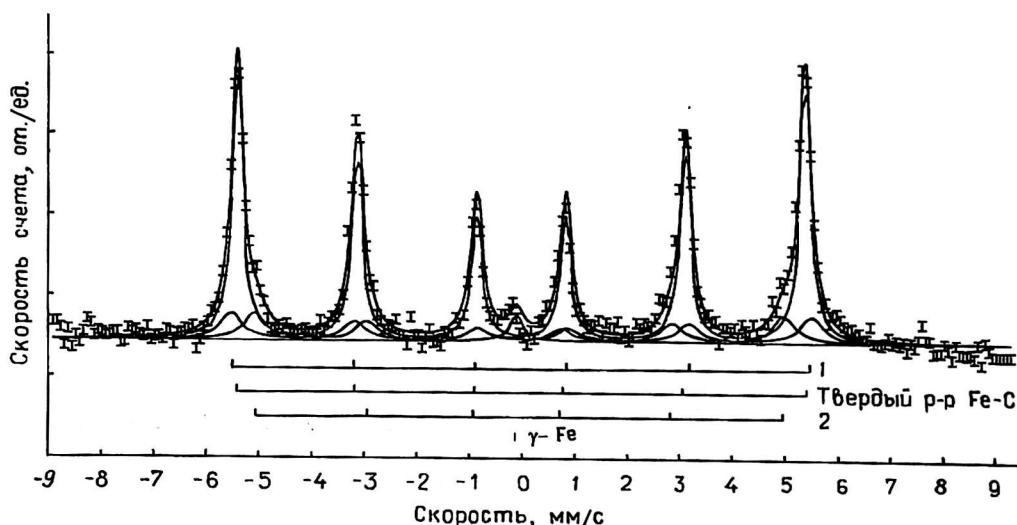


Рис. 5. Мессбауэровский спектр с поверхностного слоя образца армко-железа после БУФО и последующего старения при $T = 100^\circ\text{C}$ в течение 20 ч (характеристическое излучение ~ 20 мкм)

Относительное содержание фаз в состаренном после ультразвукового выглаживания образце армко-железа

Спектры с глубины, мкм	Относительное содержание, %			
	Твердый раствор С в α -Fe			γ -Fe
	$H_{эф} = 335\text{—}337$ кЭ	$H_{эф} = 342$ кЭ	$H_{эф} = 312$ кЭ	
0,1	49	23	25	3
20	70	14	14	2

Описание мессбауэровских спектров состаренного образца выполняли следующим образом. Подспектр с $H_{эф} = 335\text{—}337$ кЭ, имеющий максимальную интенсивность, соответствует твердому раствору углерода в α -Fe, в котором атомы ^{57}Fe не имеют примесей внедрения в двух ближайших координационных сферах. Увеличение $H_{эф}$ этого подспектра по сравнению с его значением в исходном и упрочненном образцах связано с общим увеличением содержания углерода в поверхностном упрочненном слое после искусственного старения. Аналогичное увеличение напряженности эффективного магнитного поля на ядрах атомов железа, в ближайших координационных сферах которых нет атомов внедрения, наблюдалось в ряде экспериментальных работ, сравнительный анализ которых приведен в работе [8]. Появление подспектров с $H_{эф} = 342$ и 312 кЭ связано с увеличением числа резонансных ядер, имеющих примесные атомы в ближайшем окружении.

Число атомов Fe в области ближайшего окружения равно V/v_{Fe} (где V — объем области ближайшего окружения, v_{Fe} — объем атома Fe). Если область ближайшего окружения ограничить радиусом, соответствующим расстоянию, на котором влияние дефекта на порядок меньше, чем от такого же дефекта, находящегося в первой координационной сфере, и учесть, что возмущения полей,

вносимые дефектами, убывают как $1/r^3$ (r — расстояние до дефекта), то число атомов железа в области V будет равно:

$$N = \left(\frac{4}{3} \pi 10 r_1^3 \right) / \left(\frac{\mu}{\rho N_A} \right) - 50,$$

где r_1 — радиус первой координационной сферы ($r_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} a$);

a — период решетки α -Fe, $a = 2,8606 \cdot 10^{-8}$ см;

μ — масса моля железа ($\mu = 56$ г);

ρ — плотность железа ($\rho = 7,68$ г/см³);

N_A — число Авогадро.

Тогда концентрация углерода будет — 2 ат. % (— 0,4 мас. %). Согласно результатам, приведенным в таблице, в поверхностном слое глубиной — 0,1 мкм парциальный вклад областей с повышенным содержанием углерода в результирующий спектр $\approx 0,5$, следовательно, концентрация углерода составляет — 0,2 мас. %, что значительно выше уровня предельной концентрации в низкотемпературном феррите. Такого же порядка результат получен в работе [9], где показано, что при распаде цементита в холоднодеформированной стали 80 на дислокациях в феррите располагается около 0,3 мас. % С.

Поскольку в поверхностном слое после ПУО существует градиент повышенной плотности дислокаций и соответствующий градиент упругих полей напряжений концентрация избыточных атомов углерода, по отношению к объемной концентрации, растет по мере приближения к поверхности. Этим объясняется большее увеличение относительной интенсивности подспектров с $N_{эф} = 342$ и 312 кЭ в спектре с приповерхностного слоя глубиной — 0,1 мкм по сравнению со спектром с глубины — 20 мкм.

В результате проведенных исследований структурных изменений в поверхностных слоях армко-железа, упрочненных методом ультразвукового выглаживания, установлены следующие факты:

за счет целенаправленного проведения деформационного старения возможно дополнительное повышение прочностных характеристик материалов, прошедших поверхностную упрочняющую обработку;

дополнительное упрочнение поверхности при ДС армко-железа происходит за счет закрепления дислокаций атомами углерода;

избыточное количество углерода в поверхностных упрочненных слоях (по сравнению с номинальным составом исходного образца) появляется за счет диффузии углерода из объема материала в приповерхностные слои с повышенной плотностью дислокаций;

поверхностный упрочненный слой α -Fe может поглотить количество углерода, большее уровня его предельной концентрации в низкотемпературном феррите, без образования химических соединений;

при поверхностной упрочняющей обработке армко-железа в поверхностном слое толщиной не менее 20 мкм образуются области, в которых атомы ^{57}Fe имеют ближайшее окружение по типу аустенита.

Литература

1. Алехнин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
2. Бульчев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
3. Бабич В. К., Гуль Ю. Т., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. — М.: Металлургия, 1972. — 320 с.

4. Муханов И. И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка стали и чугуна//Вестник машиностроения, 1969. № 6. С. 64–66.
5. Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Цвельо Ш. Ультразвуковая обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
6. Новакова А. А., Кузьмин Р. Н. Мессбауэровская конверсионная спектроскопия и ее применения. — М.: МГУ, 1989. — 72 с.
7. Ино Н., Мориya Т., Fujita F. E., et al. A Study of the Mossbauer Effect during the Tempering of Iron-Carbon Martensite//J. of the Physical Society of Japan, 1968. V. 25. № 1. July. P. 88–99.
8. Литвинов В. С., Каракишев С. Д., Овчинников В. В. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия сплавов. — М.: Metallurgy, 1982.
9. Гаврилюк В. Г. Исследование состояния цементита в холоднотемпературной стали методом ядерного гамма-резонанса//ФММ, 1978. Т. 45. Вып. 5. С. 968–980.

STUDY OF STRENGTHENING MECHANISM DURING STRAIN-AGEING OF ARMCO-IRON USING MOSSBAUER SPECTROSCOPY

V. P. Alekhin, V. I. Koshkin, G. A. Sirotnina
Moscow Motor Car Construction Institute, Moscow, Russia

A. A. Novakova
Moscow State University, Moscow, Russia

Structural changes in surface layers of armco-iron were studied using Mossbauer spectroscopy during the process of strain-ageing after abrasive-free ultrasonic finish treatment (AFUFT). This treatment of armco-iron is shown to be accompanied by the formation of regions not less 20 μm thickness resembling γ phase. Strain ageing which follows results in diffusion redistribution of carbon from bulk material to the specimen surface with increased dislocation density.