УДК 621.9.048.6
DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-2-10-15

В.А. Александров [1], к.т.н., **Б.А. Кудряшов [1],** д.т.н.,
К.К. Иванов [1], магистрант, **В.М. Вдовин [2],** ведущий инженер-технолог
([1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64;
[2]АО НПО им. Лавочкина, 141400, Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д.24)
E-mail: met.madi@mail.ru; cudryashov.madi@yandex.ru

Влияние ультразвуковых колебаний на процесс старения различных металлических сплавов*

Приведен краткий литературный обзор по влиянию ультразвука на старение различных сплавов. Рассмотрено влияние ультразвука на процессы старения мартенситных сплавов. Разработана ультразвуковая установка, позволяющая повысить влияние ультразвука на старение мартенситных сталей. Приведены результаты исследований влияния частоты и интенсивности звуковых колебаний на изменение механических свойств в процессах старения.

Ключевые слова: ультразвук; старение металлических сплавов; упрочнение.

V.A. Alexandrov [1], Can. Sc. Tech., **B.A. Kudryashov [1],** Dr. Sc. Tech.,
K.K. Ivanov [1], Master degree student, **V.M. Vdovin [2],** Leading engineer-technologist
([1]*Moscow Road-Transport State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319,*
[2] PC Lavochkin SPC, 24, Leningradskaya Str., Khimky, Moscow Region, 141400)

Supersonic oscillation impact upon aging process of different metal alloys

A short literary review on the super-sound impact upon different alloy aging is shown. The super-sound impact upon aging processes martensite alloys is considered. A super-sonic plant allowing increasing a super-sound impact upon martensite steel aging is developed. There are shown the investigation results of frequency and intensity of sound oscillation upon stress-strain property changes in aging processes.

Keywords: super-sound; metal alloy aging; strengthening.

Введение

Целесообразность использования ультразвуковых колебаний для интенсификации термической обработки сплавов не вызывает сомнений, в связи с тем, что в тех случаях, когда необходимо ускорить процессы, связанные с небольшими перемещениями атомов, применение ультразвука может иметь большое значение. В работе Гудцова Н.Т., Гавзе М.Н. [Гудцов Н.Т., Гавзе М.Н. «Журнал неорганической химии», Т.1, вып. 7, 1956], исследовали влияние ультразвука при частотах от 300 до 1500 кГц на процессы дисперсионного твердения дуралюмина. Было установлено, что под действием ультразвука старение дуралюмина существенно ускоряется. На сталях эффект действия ультразвука был достаточно слаб.

* Статья выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ №2019-1342.

Было исследовано воздействие ультразвука при 700…760° на сплав с 60 % Cr, 15 % Mo и 25 % Fe. При дисперсионном твердении с ультразвуком в течение 1 ч твердость этого сплава достигла значения, которое при данной температуре без ультразвука достигается только через 50 ч.

Изучено [Schenk G., Schmidtmann O. Archiv fur das Eisenhuttenwesen, H. 11/12, 1954] влияние ультразвуковых колебаний частотой 430 кГц при удельной мощности 6,5 Вт/см^2 на процессы старения при 20° закаленной стали, содержащей 0,06 % C. Однако заметного эффекта ускорения процесса старения при применении ультразвука не было установлено. Это объясняется тем, что при комнатной температуре приток энергии от ультразвуковых колебаний, использованных в данном опыте, был недостаточен для деформации кристаллической решетки, при которой наблюдается усиление диффузии растворенных атомов упрочнителя.

Исследователи влияния ультразвука на старение дуралюминов разных марок Ф.К. Горский и В.И. Ефремов установили, что ультразвуковые колебания частотой 30 кГц и удельной мощностью вибратора 10 Вт/см^2 ускоряют естественное старение сплава 4,5 % Cu; 0,8% Mg и 0,5% Si в 63 раза. Результаты опыта показали, что старение в ультразвуковом поле при комнатной температуре имеет преимущество перед искусственным старением при 100° вследствие сохранения дисперсности частиц упрочняющей фазы и стабильности твердости.

Ультразвуковые колебания уменьшают энергию активации диффузии.

Погодина-Алексеева К.М. и Эскин Г.И. проводили исследование по старению с ультразвуком алюминиевых сплавов, подвергающихся естественному и искусственному старению (Д1, Д16, В95 и АЛ4). Ими было установлено, что дуралюмины Д1 и Д16 в случае применения ультразвука частотой 1,0 МГц и удельной мощностью 1,6 Вт/см^2 стареют при комнатной температуре в 20…25 раз быстрее, причем конечное упрочнение у «озвученных» образцов оказалось большим, чем у «неозвученных». У сплава АЛ4, подвергающегося в обычных условиях лишь искусственному старению, ультразвук вызвал твердение при комнатной температуре, и упрочнение оказалось выше, чем при искусственном старении по стандартному режиму. Было установлено, что в сплаве В95 при естественном и при искусственном старении (125°) ультразвук значительно ускоряет процесс дисперсионного твердения.

Методика проведения исследований

В качестве материалов для исследований использовались стали: ХН77ТЮР, Х15Н9Ю, Х12Н10М2Т.

Образцы, изготовленные из мартенситных сталей, нагревались до 1080 ^{o}C, выдерживались при этой температуре в течение 8 ч, затем охлаждались на воздухе (подвергались нормализации). Эти образцы подвергались искусственному старению по различным режимам (как с применением ультразвуковых колебаний в процессе старения, так и без таковых) с целью выбора кратковременного режима, обеспечивающего получение оптимальных механических свойств.

Металлографические исследования проводили на световом микроскопе Axiovert 25 CA (Carl Zeiss), дюрометрические исследования – на твердомере AFFRI Dm-8. Исследования субмикровыделений проводили с помощью мультимикроскопа СММ-2000 в атомно-силовом режиме.

Результаты исследований

Проведённые исследования при различных частотах и интенсивностях показали, что эффективность влияния ультразвука на процессы старения в широком диапазоне частот (300…4500 кГц*)* практически не зависит от частоты колебаний, но заметно возрастает с увеличением интенсивности ультразвука. Этот вывод был использован при изготовлении аппаратуры для исследования. Интенсивность ультразвука плоской волны пропорциональна квадратам частоты и амплитуды колебаний. Отсюда следует, что целесообразно применять аппаратуру, обеспечивающую получение максимальной интенсивности. Передавать акустическую энергию в твердые тела можно ультразвуковыми генераторами с магнитострикционными преобразователями с частотой колебаний ниже 40 кГц. Амплитуда колебаний не должна быть больше некоторой критической величины, при которой наступает разрушение образца. Поэтому применить колебания большой интенсивности на низких звуковых и дозвуковых частотах недопустимо.

Исходя из этих соображений использовали магнитострикционные излучатели ультразвука (20…46 кГц).

Для возбуждения в образце механических колебаний звуковой частоты была использована ультразвуковая установка, функциональная схема которой представлена (рис. 1). Эта установка состоит: из генератора электриче-

ских колебаний *1*, электрического генератора подмагничивания *2*, излучателя ультразвука *3*, электропечи *4* с термопарой *5* и регулятором температуры *6*. Образец *7* связывался с излучателем ультразвука через удлинитель *8* с резьбовыми соединениями.

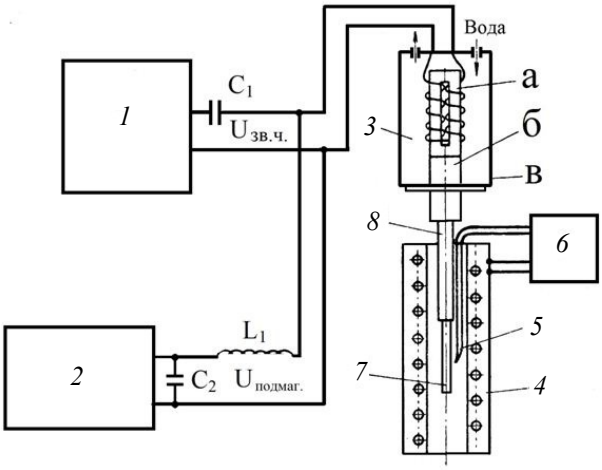

Рис. 1. Функциональная схема установки для старения с наложением ультразвука

Генератор электрических колебаний позволяет получать на выходе ток частотой 7…100 кГц при выходной мощности до 800 Вт. Генератор подмагничивания, смонтированный с регулятором напряжения, дает возможность получать ток до 40 А.

Излучатель ультразвука (см. рис. 1) состоит из магнитострикционного пакета «а», передающего стержня «б» и корпуса «в». Пакет 30×30×100 мм набран из пластин пермендюра толщиной 0,1 мм. Пакет припаян к передающему ультразвук стержню, прикрепленному к корпусу. Обмотка пакета выполнена проводом сечением 1,5 мм^2; на каждую ножку пакета намотано по 22 витка. Корпус герметизирован силиконовыми прокладками, вибратор охлаждается проточной водой. Система «пакет – передающий стержень – удлинитель с образцом» имела размеры, обеспечивающие резонансную частоту колебаний 23…25 кГц.

Трубчатая электропечь приспособлена для вертикальной установки. Несколько образцов испытано более мощным излучателем с концентратором ультразвука частотой 20…22 кГц.

Образец привинчивали к удлинителю, а удлинитель к передающему стержню излучателя. Режим питания излучателя устанавливали экспериментально для образца с целью обеспечения одинаковой энергии колебаний во всех образцах, озвучивали на одном и том же вибраторе.

После подбора режима образец помещали в нагретую печь и выдерживали при выключенном ультразвуке в течение 10…15 мин до достижения температуры старения, затем проводили старение образца с наложением ультразвука, после чего ультразвук выключали, образец вынимали из печи и подвергали дальнейшим исследованиям, замеру твердости и структурному анализу. При проведении опытов в системе «излучатель – передающий стержень – удлинитель – образец» возбуждались продольные стоячие волны.

Для практических целей наиболее удобно оценивать знакопеременную упругую деформацию, изменяющуюся по синусоидальному закону, в каком либо сечении образца по амплитуде напряжений и скорости их изменения (частоте).

Напряжения в образце при возбуждении в нём упругих колебаний ультразвуковой частоты приближенно можно определить по формуле

$$\sigma = -\sqrt{E}\,\rho\cdot\omega\,A\,\sin\omega\,x/C\cdot\cos\omega\,t, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга; t – время; x – расстояние от конца образца.

Амплитудное значение напряжения в средней части образца будет равно:

$$\sigma_m = -\sqrt{E}\,\rho\times\omega\,A = 2\pi\text{-}\sqrt{E}\,\rho\,f\,A\,. \qquad (2)$$

Амплитуду перемещения конца образца измеряли под микроскопом. На боковую поверхность у конца образца наклеивали кусочек черной бумаги с пылинками серебра. При вибрации освещенная пылинка была видна в микроскопе в виде линии, длина которой без размера светящейся точки (без вибрации) равна удвоенной амплитуде перемещения. Измерения проводили на холодном образце. Частоту ультразвука измеряли электронным частотомером.

Старение образцов осуществляли ультразвуковыми колебаниями с частотой 23…26 кГц; амплитуда перемещения конца образца составляла 5 мкм; опыты проводили, для мартенситных сталей при температурах 700, 750 и 800 °С и различных выдержках. Несколько образцов озвучивали при 700°, частоте 20…21 кГц и амплитуде около 8 мкм. В этих условиях акустическая энергия в образце примерно в 2 раза выше, чем при амплитуде 5 мкм.

Модуль упругости сплава ХН77ТЮР уменьшается по мере нагревания образца и при 700 и 800 °С равен соответственно$14\cdot10^6$ и $12{,}4\cdot10^6$ МПа.

Расчет показал, что в опытах с амплитудой перемещения 5 мкм напряжения в образце при температурах старения 700° составили 23…27 МПа, а в опытах с амплитудой 8 мкм 33…37 МПа.

Примененные режимы старения, характеристики звуковой вибрации, расчетные значения напряжения в образце и значения твердости стали после старения приведены в табл. 1.

1. Режимы и результаты старения с ультразвуком сплава ЭИ437Б

№	Режим термообработки	Напряжение в образце, σ_m, МПа	Твердость после старения, HRB
1	Закалка + стандартное старение, 700 °С, 16 ч		98…100
2	Закалка + старение с ультразвуком 700 °С, 24,3 кГц, 5 мкм, 30 мин	26,1	85…88
3	То же 60 мин	26,1	90…91
4	То же 45 мин	26,1	87…89
5	То же 15 мин	26,1	85…87
6	Закалка + старение с ультразвуком 800 °С, 25 кГц, 5 мкм, 15 мин	25,3	93…96
7	То же 23 кГц, 30 мин	23,3	96…98
8	Закалка + старение с ультразвуком 750 °С, 24,6 кГц, 5 мкм, 60 мин	25,4	92…96
9	То же 24,8 кГц, 5 мкм, 30 мин	25,5	92…94
10	То же 23,8 кГц, 5 мкм, 15 мин	24,5	93…95
11	Закалка + старение с ультразвуком 800 °С, 25,2 кГц, 5 мкм, 42 мин	25,5	97…98
12	Закалка + старение с ультразвуком 800 °С, 25,6 кГц, 5 мкм, 90 мин	26,0	96…98
13	Закалка + старение с ультразвуком 700 °С, 23,3 кГц, 5 мкм, 30 мин	25,1	83…89
14	Закалка + старение с ультразвуком 700 °С, 20,6 кГц, 8 мкм, 15 мин	35,5	93…95
15	Закалка + старение с ультразвуком 700 °С, 20,6 кГц, 8 мкм, 17 мин	35,0	96…98
Примечание. Твердость до старения нагрев до 1080 °С; выдержка 8 ч; охлаждение – воздух 68…72 HRB.			

На рис. 2 представлены структуры сплава ХН77ТЮР при 700 °С с ультразвуком и без него. На рис. 3 представлены кривые дисперсионного твердения образца из ХН77ТЮР при 700 °С с ультразвуком и без него. Штриховкой показана зона твёрдости, достигаемой при обычном режиме старения (700 °С, 16 ч). Из данных приведённых на рис. 3 видно, что старение с ультразвуком протекает быстрее, чем без наложения звуковых колебаний, причём при больших напряжениях старение протекает значительно быстрее. При напряжении 35 МПа можно достигнуть твердости 98…100 HRB за 20…25 мин, в то время как при обычном режиме старения эта твердость достигается за 16 ч.

Очевидно, механические колебания ультразвуковой частоты, подвергая кристаллическую решетку закалённой стали многократно циклически повторяющейся деформации (растяжения – сжатие), способствуют усилению диффузионных процессов, приводящих к выделению дисперсных субмикроскопических частиц из пересыщенного твёрдого раствора. Исходя из чего, можно предположить, что величина коэффициента диффузии легирующих элементов, образующих упрочняющую фазу, возрастает за счет уменьшения энергии активации диффузии (теплоты разрыхления).

Частичный фазовый анализ, заключавшийся в определении количества интерметаллидной фазы, подтвердил это предположение. При старении с наложением ультразвуковых колебаний за 15…17 мин выделилось из твердого раствора такое же количество интерметаллидной фазы (8,62…8,91 %), как и при стандартном класссическом старении при 700 °С 16 ч (8…9 %).

Интенсивный рост твёрдости при старении с наложением ультразвуковых колебаний, старение является следствием не механического наклёпа, а ускоренного выделения дисперсной интерметаллидной фазы. Это тем более очевидно, что деформации, которым подвергался образец при наложении звуковых колебаний, находился в пределах упругой области.

Несколько образцов были подвергнуты ультразвуковому старению выше оптимальной температуры при 750 и 800 °С. Кривые изменения твёрдости в течение старения при 750 и 800 °С приведены на рис. 4.

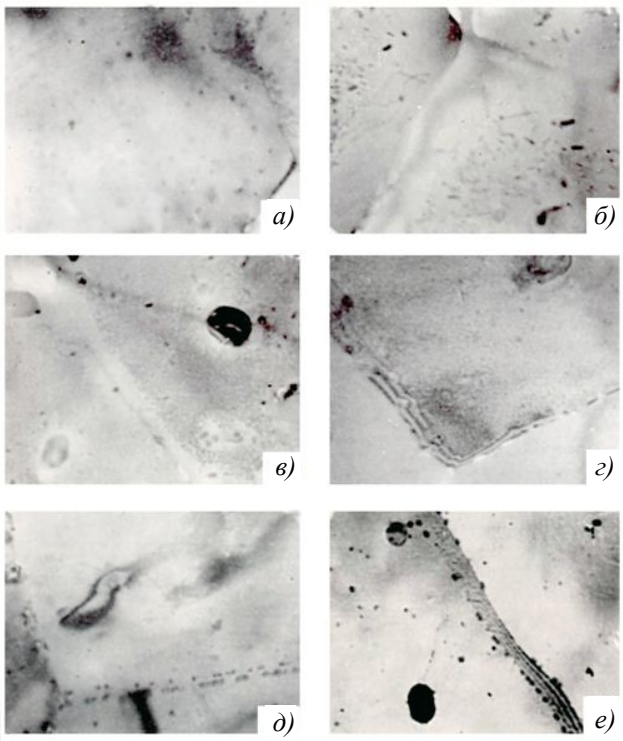

Рис. 2. Структуры сплава ХН77ТЮР после старения без ультразвука (*а*, *в*, *д*) и с наложением звуковых колебаний (*б*, *г*, *е*)

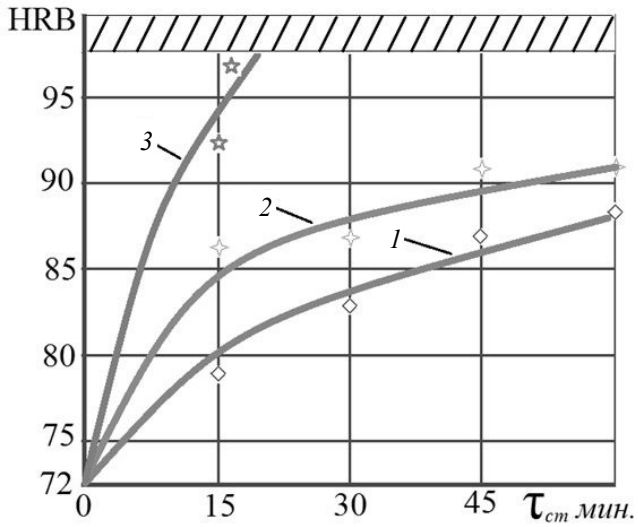

Рис. 3. Изменение твердости в течение старения при 700 °С, образцов из ХН77ТЮР:
1 – стандартное старение; *2* – с ультразвуком, σ_m = 25 МПа; 3 – с ультразвуком, σ_m = 35 МПа

Из графика следует, что, в отличие от старения при 800 °С без применения ультразвука, когда максимальное значение твердости получаются ниже, чем во время старения при 700 °С (HRB = 93). Старение с ультразвуком при повышенной температуре (800 °С) даёт возможность достигать уровня стандартного упрочнения 98…100 HRB за сравнительно короткое время при использовании генератора и излучателя.

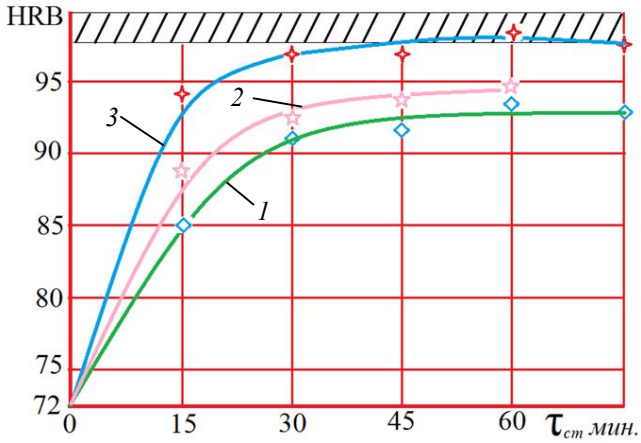

Рис. 4. Изменение твердости в случае старения образца из ХН77ТЮР при повышенной температуре:
1 – старение при 800 °С без ультразвука;
2 – старение при 750 °С с ультразвуком, σ_m = 25 МПа;
3 – старение при 800 °С с ультразвуком, σ_m = 25 МПа

По-видимому, ультразвук, значительно ускоряя процесс выделения из твёрдого раствора субмикроскопических фаз-упрочнителей, мало влияет на скорость коагуляции этих фаз. В данном случае процесс старения интенсифицируется не только влиянием ультразвука, но и повышенной температурой.

Выводы

1. Ультразвуковые колебания частотой 20…26 кГц ускоряют старения образцов.

2. Увеличение энергии ультразвука в образце в 2 раза значительно усиливает эффект воздействия ультразвука на процесс старения и позволяет сократить длительность старения по сравнению со стандартным режимом более, чем в 10 раз.

3. Применение ультразвука во время старения при 800 °С позволяет устранить влияние коагуляции и получить нужное упрочнение за значительно более короткий срок, чем при обычном старении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. **Приходько, В.М., Александров, В.А., Фатюхин, Д.С., Петрова, Л.Г.** Влияние ультразвуковой кавитации, на состояние поверхностного слоя азотированной стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – №5(719). – С. 55-59.

2. **Александров, В.А., Казанцев, В.Ф., Фатюхин, Д.С.** Формирование поверхностного слоя методом комплексного ультразвукового воздействия и азотирования // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – №3(21). – С. 33-36.

3. **Александров, В.А., Чудина, О.В., Фатюхин, Д.С.** Влияние ультразвуковой кавитации на состояние поверхности конструкционных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2(74). – С. 3-6.

4. **Кудряшов, Б.А., Ливанский, А.Н., Чендаров, А.С.** Особенности конструирования высокоамплитудных ультразвуковых колебательных систем // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2015. – №10(52). – С. 27-32.

5. **Калачев, Ю.Н., Кудряшов, Б.А., Сундуков, С.К.** Оборудование для ультразвуковой обработки сложнопрофильных деталей // Наукоемкие технологии на современном этапе машиностроения // Матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф., 19-21 мая 2016 г., г. Москва, МАДИ, – 2016. – С. 77-78.

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M., Alexandrov, V.A., Fatyukhin, D.S., Petrova, L.G. Supersonic cavitation impact upon surface layer state of nitrided steel // *Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2015. – No.5(719). – pp. 55-59.

2. Alexandrov, V.A., Kazantsev, V.F., Ftyukhin, D.S. Surface layer formation by method of complex supersonic impact and nitriding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – No.3(21). – pp. 33-36.

3. Alexandrov, V.A., Chudina, O.V., Fatyukhin, D.S. Supersonic cavitation impact upon surface state of structural steel // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2011. – No.2(74). – pp. 3-6.

4. Kudryashov, B.A., Livansky, A.N., Chendarov, A.S. Peculiarities in design of high-amplitude supersonic oscillation systems // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.10(52). – pp. 27-32.

5. Kalachyov, Yu.N., Kudryashov, B.A., Sundukov, S.K. Equipment for supersonic treatment of complex parts // *Science Intensive Technologies at Modern Stage of Mechanical Engineering* // Proceedings of the VIII-th Inter. Scientif.-Tech. Conf., May 19-21, 2016, Moscow, MADI, - 2016. – pp. 77-78.

Рецензент д.т.н. М.А. Тамаркин