

УДК 621.9.048.6-034.14

В.А. Хачатурян

асп., МАДИ,

тел.: 8(499)155-03-55,

e-mail: v.khachatur9n@gmail.com

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ПОВЕРХНОСТНУЮ ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ

Аннотация. Статья посвящена экспериментальным исследованиям влияния ультразвуковой обработки в жидкой среде на структуру и твердость поверхностного слоя конструкционных сталей. Установлены оптимальные технологические режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие максимальное упрочнение без нарушения целостности поверхности изделия. Доказано, что упрочнение стальной поверхности обусловлено формированием в поверхностном слое развитой дислокационной структуры, измельчением зерна и микронапряжениями.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, поверхностное пластическое деформирование, микроструктура, твердость.

Введение

В современном машиностроении при производстве и ремонте автотракторной техники широко применяют ультразвуковые методы очистки поверхности от загрязнений. Ультразвуковая очистка может быть как финишной обработкой [1, 2], так и промежуточной перед нанесением на поверхность упрочняющего покрытия [3], что даст экономию материальных и трудовых ресурсов, уменьшит простой оборудования и повысит производительность труда. Существующие публикации по влиянию ультразвуковой очистки в жидких моющих средах на состояние

поверхности, в подобающем своем большинстве, посвящены исследованию процессов эрозионного разрушения поверхности при ультразвуковом воздействии. Однако практически отсутствуют исследования влияния ультразвуковой кавитации на изменение структуры и свойств поверхностного слоя обрабатываемых материалов.

Целью настоящей работы является изучение влияния ультразвукового воздействия на структуру и твердость поверхностного слоя конструкционных сталей и определения оптимальных режимов ультразвуковой обработки, позволяющих повысить поверхностную твердость без нарушения целостности поверхности деталей.

Материалы и методика проведения

Исследовали влияние ультразвуковой обработки (УЗО) на структуру и твердость армко-железа, сталей 45, 40Х и 10Х18Н9. Методика проведения экспериментальных исследований заключается в следующем. В технологическую емкость с водой погружают стержневой магнитострикционный преобразователь, работающий с частотой акустических колебаний $f = 22$ кГц. Образцы цилиндрической формы диаметром 15 мм и высотой 10 мм также погружают в емкость с водой и подвергают обработке. Основными технологическими параметрами УЗО являются: первое – амплитуда колебательных смещений ξ , зависящая от типа преобразователя, которую варьировали от 7 мкм до 45 мкм. Второе – это длительность обработки, минимальная продолжительность воздействия составляет 15 мин, при меньшей продолжительности процесса видимых изменений в структуре и свойствах не происходит, а максимальная продолжительность составляет 60 мин, после чего на поверхности появляются эрозионные кратеры. Третий изменяемый параметр – это расстояние от ультразвукового преобразователя до обрабатываемой поверхности. Для эффективного ультразвукового

поверхностного упрочнения деталь размещается на расстояние 6...10 мм от преобразователя, а в целях получения равномерно упрочненного слоя положение детали меняли, что обеспечивало циркуляцию акустических потоков внутри технологической емкости и равномерное ультразвуковое воздействие на всю поверхность изделия.

Металлографические исследования поверхностного слоя проводили на световом микроскопе Axiovert 25 CA CarlZeiss, а дюрOMETрические исследования – на микротвердомере ПМТ-3.

Обсуждение результатов исследований

В процессе работы магнитострикционного преобразователя в ультразвуковом частотном диапазоне в жидкости развиваются кавитационные процессы, сопровождающиеся образованием кумулятивных струй жидкости в результате схлопывания кавитационных пузырьков, формированием ударных волн, генерируемых из зоны схлопывания пузырьков и возникновением коллективной ударной волны [4]. По характеру производимого действия и по длительности существования в акустическом поле кавитационные пузырьки разделяют на захлопывающиеся и пульсирующие. При захлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, развивающая значительные давления. Многократное воздействие в одной и той же области большого количества отдельных захлопывающихся пузырьков приводит к повышению плотности дислокаций, которое носит накопительный характер. В начале воздействия пузырьков на поверхности преобладают упругие деформации, затем, накапливаясь по величине, деформации становятся пластическими и при повышении критических значений деформации может произойти разрушение металла, которое происходит путем деления материала на макроскопические части. Процесс разрушения состоит из двух стадий: зарождения трещины и ее распространения через все сечение образца. Различают два вида разрушения:

– отрыв в результате действия растягивающих нормальных напряжений;

– срез под действием касательных напряжений.

Отрыв не сопровождается предварительной пластической деформацией. Разрушению путем среза всегда предшествует пластическая деформация. Таким образом, отрыв вызывает хрупкое разрушение, а срез – вязкое. При этом распространение трещины может идти как по телу зерна – транскристаллитное разрушение, так и по границам между зернами – интеркристаллитное разрушение [5]. Однако цель работы – обеспечить определить такие режимы ультразвуковой обработки, которые обеспечили бы максимальный уровень упрочнения конструкционных сталей без нарушения целостности поверхности.

В результате описанного ударного акустического воздействия вблизи поверхности металла формируется масса многократно захлопывающихся пузырьков, которые активируют процессы увеличения микронапряжений в кристаллической решетке, повышения плотности дислокаций и измельчения зерна. Кроме того, авторы работы [6] наблюдали на границах зерен после деформации межфазные дефекты, которые представляют собой межфазные дислокации, решеточные дислокации и субмикropоры, которые также вносят вклад в повышение уровня прочности сталей.

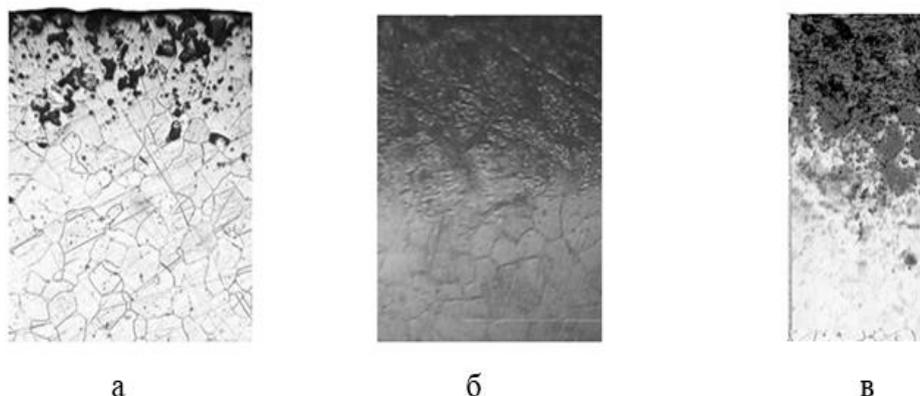


Рис. 1. Микроструктуры армко-железа (а, б) и стали 45 (в) после ультразвуковой обработки в течение 60 мин при а) $\xi = 7$ мкм, б) и в) $\xi = 15$ мкм

На рисунке 1 приведены микроструктуры армко-железа и стали 45 после ультразвуковой обработки в течение 60 мин с амплитудами колебательных смещений $\xi = 7$ мкм и $\xi = 15$ мкм. С увеличением амплитуды колебательных смещений увеличивается интенсивность ультразвукового воздействия, что приводит не только к формированию на поверхности образца слоя развитой дислокационной структуры, но и к измельчению зерна, что дополнительно повышает поверхностную твердость стали.

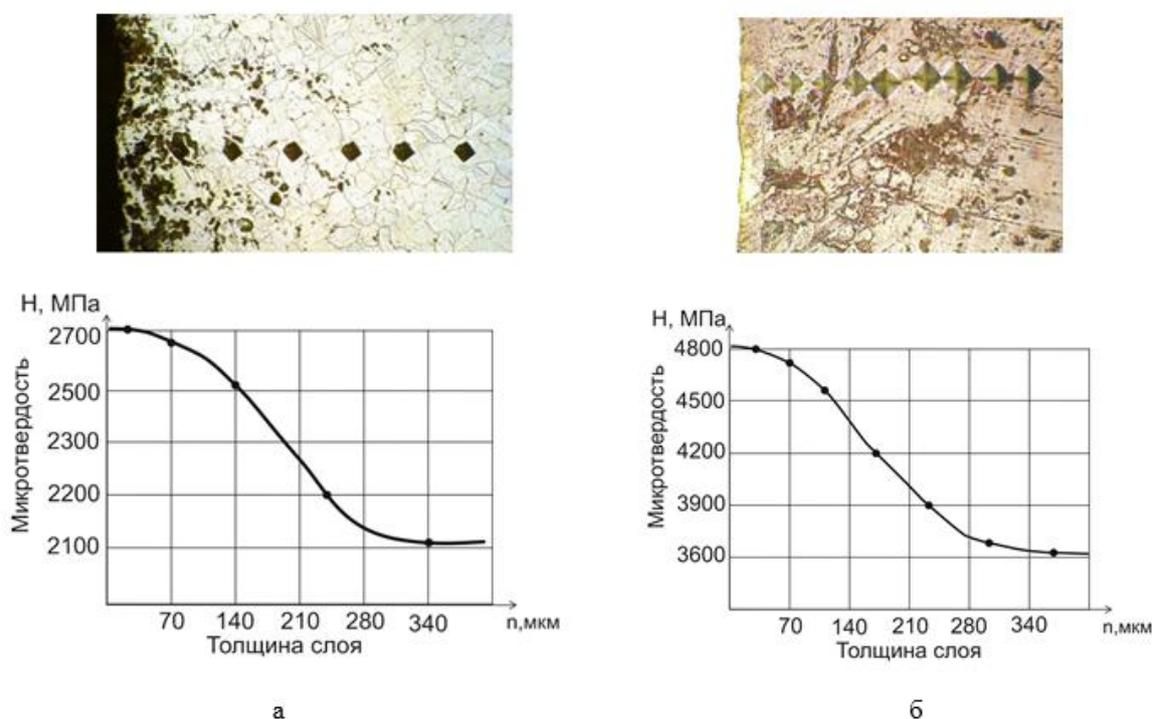


Рис. 2. Сопоставление микроструктуры и твердости армко-железа (а) и стали 45 (б) после ультразвуковой обработки в течение 30 мин при $\xi = 7$ мкм (а) и $\xi = 15$ мкм

На рисунке 2 сопоставлены структуры с твердостью армко-железа и стали 45, подвергнутых УЗО в течение 30 мин с амплитудами колебательных смещений $\xi = 7$ мкм и $\xi = 15$ мкм соответственно.

Кроме увеличения плотности дислокаций и измельчения зерна в приповерхностном слое наблюдается увеличение микронапряжений кристаллической решетки. В работе [5] исследовали влияние

ультразвукового воздействия на характер изменения микронапряжений в поверхностном слое. С этой целью электрографическим методом, основанном на эффекте Кирлиана, путем цифровой обработки цветного изображения получен количественный структурный и фазовый экспресс-анализ, который позволил выявить взаимосвязь между структурой металла характером микронапряжений в нем. Полученные результаты указывают нерегулярный характер распределения максимальных и минимальных значений микронапряжений по озвучиваемой поверхности. Такие неравномерные микронапряжения по поверхности образцов являются следствием сложных нестационарных гидродинамических процессов, протекающих в жидкостях в условиях акустического воздействия и играют роль концентраторов напряжения. Известно, что в присутствии концентраторов напряжений механические свойства изделий, в особенности эксплуатируемых при циклических и ударных нагрузках, снижаются. Для получения равномерно упрочненного слоя достаточно применить технологические приемы, заключающиеся в изменении положения обрабатываемой детали в процессе озвучивания относительно преобразователя.

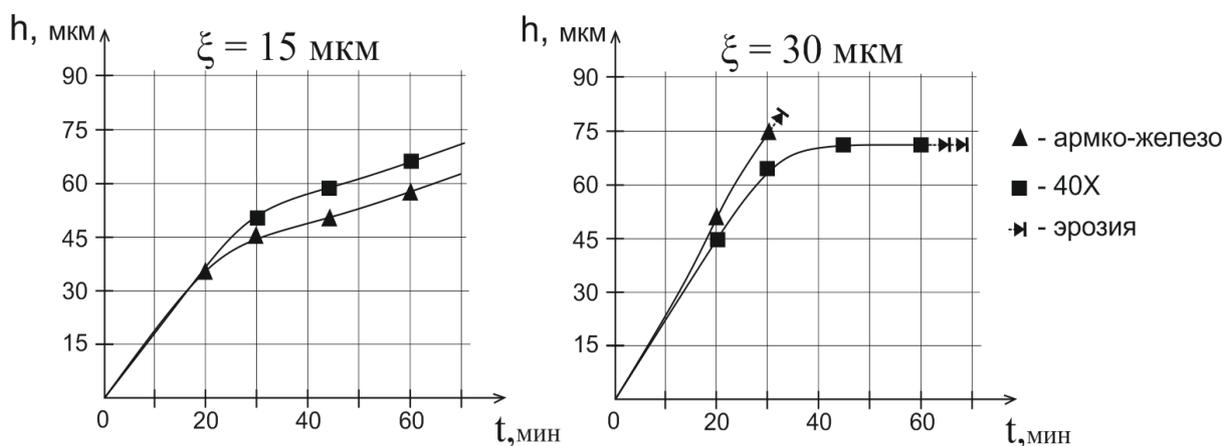


Рис. 3. Влияние амплитуды колебательных смещений ξ и длительности ультразвуковой обработки на толщину упрочненного слоя армко-железа – ▲ и стали 40X – ■

Установлено, что толщина упрочненного слоя в основном зависит от технологических параметров УЗО. На рисунке 3 приведены зависимости влияния амплитуды колебательных смещений и длительности обработки на толщину упрочненного слоя для армко-железа и стали 40Х.

Экспериментально установлено, что максимальная толщина упрочнения без нарушения целостности поверхности обеспечивается на модельном материале – армко-железе и на стали 10Х18Н9 уже через 30 мин обработки и достигает 70 мкм. Для получения упрочненного слоя такой же толщины на сталях 45 и 40Х, ультразвуковая обработка проводится в течение 40...45 мин.

По результатам экспериментальных исследований определены преимущественные технологические режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие максимальное упрочнение без нарушения целостности поверхности изделия. Для сталей с ферритной и аустенитной структурой оптимальными являются амплитуда колебательных смещений $\xi = 7...30$ мкм и длительность обработки – 15...30 мин. А для сталей с перлитной структурой – $\xi = 15...50$ мкм и длительность – 30...60 мин.

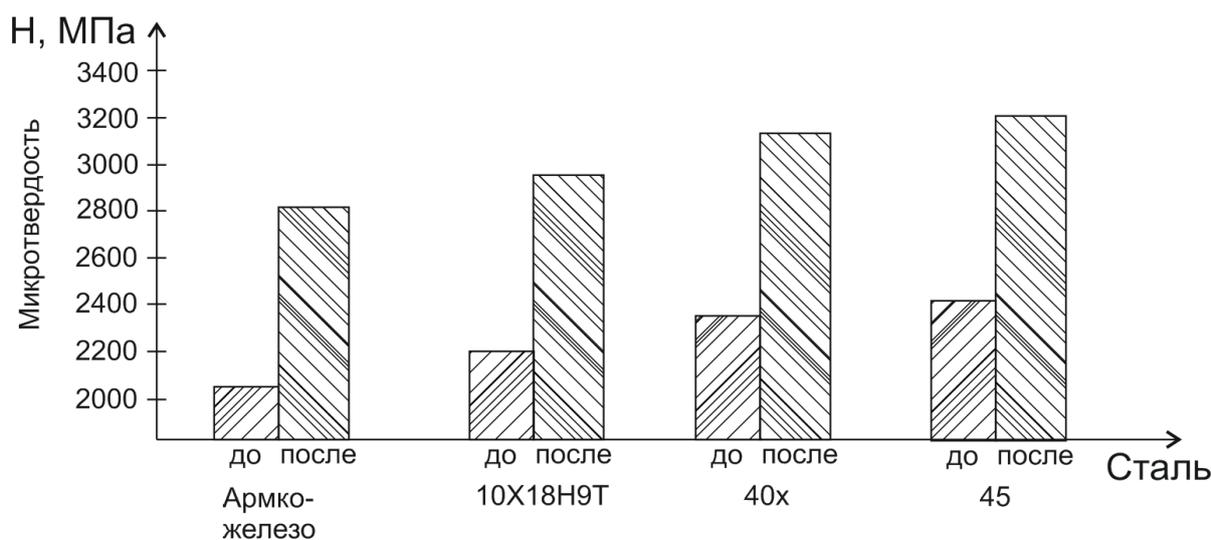


Рис. 4. Влияние ультразвуковой обработки на прирост микротвердости поверхностного слоя сталей

Ультразвуковая обработка сталей по предложенным режимам, повышает микротвердость поверхностного слоя в 1,3...1,5 раза. Значения микротвердости армко-железа, сталей 10X18H9, 45, 40X до и после ультразвуковой обработки приведены на рис. 4. Установлено, что уровень упрочнения в значительной мере зависит от структуры стали. Установлено, что наибольшее упрочнение достигается в сталях с аустенитной структурой, в меньшей степени – с ферритной, а в сталях с перлитной структурой уровень упрочнения зависит от содержания углерода: чем больше углерода в стали, тем меньше прирост твердости в поверхностном слое обрабатываемой стали.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования влияния ультразвуковой обработки в жидкой среде на структуру и твердость поверхностного слоя сталей ферритного, аустенитного и перлитного классов.

2. Установлены оптимальные технологические режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие максимальное упрочнение без нарушения целостности поверхности изделия. Показано, что ультразвуковое воздействие повышает микротвердость поверхностного слоя в 1,3...1,5 раза, причем уровень упрочнения зависит от структуры стали, а толщина упрочненного слоя от технологических параметров обработки.

3. Установлено, что наибольшее упрочнение достигается в сталях с аустенитной структурой, в меньшей степени – с ферритной, а в сталях с перлитной структурой уровень упрочнения зависит от содержания углерода: чем больше углерода в стали, тем меньше прирост твердости в поверхностном слое обрабатываемой стали.

4. Показано, что упрочнение стальной поверхности вызвано в основном формированием в поверхностном слое развитой дислокационной

структуры по классическим механизмам пластической деформации, измельчением зерна и микронапряжениями.

Литература

1. Панов А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. М.: 1984. 88 с.
2. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общ. ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
3. Алисов В.Е., Чудина О.В. О влиянии кавитации на процесс разрушения поверхностных пленок загрязнений при ультразвуковой очистке режущего инструмента // Эффективность использования инструмента с износостойкими покрытиями. М.: ВНИИИнструмент, 1985. С.111–113.
4. Буравова С.Н. Повреждаемость поверхности при кавитационной эрозии // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 9.
5. Чудина О.В., Александров В.А., Фатюхин Д.С. Влияние ультразвуковой кавитации на состояние поверхности конструкционных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 3–6.
6. Губенко С.И. Сопротивление разрушению межфазных границ включение – матрица при пластической деформации сталей // Сборник тезисов. М.: НИТУ «МИСиС», 2014. С. 47–48.

References

1. Panov A.P. *Ul'trazvukovaja ochistka precizionnyh detalei* (Ultrasonic cleaning of precision parts), Moscow, 1984, 88 p.
2. Abramova O.V., Prihod'ko V.M. *Moshnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii*, Moscow, Janus-K, 2006, 688 p.
3. Alisov V.E., Chudina O.V. *O vlijanii kavitacii na process razrushenija poverhnostnyh plenok zagrjaznenii pri ul'trazvukovoi ochistke rezhushhego*

instrumenta. Yeffektivnost' ispol'zovaniya instrumenta s iznosostoikimi pokrytijami, Moscow, VNIInstrument, 1985, pp. 111–113.

4. Buravova S.N. *Zhurnal tehnicheckoi fiziki*, 1998, № 9.

5. Chudina O.V., Aleksandrov V.A., Fatyuhin D.S. *Uprochnjayushie tehnologii i pokrytija*, 2011, № 2, pp. 3–6.

6. Gubenko S.I. *Soprotivlenie razrusheniyu mezhfaznyh granic vklyuchenie – matrica pri plasticheskoi deformacii stalei*. Sbornik tezisov, Moscow, NITU «MISiS», 2014, pp. 47–48.

V. Khachaturyan

Effect of ultrasonic treatment steel surface

Abstract. The experimental researches of influence ultrasonic treatment in the liquid environment on the surface structure and hardness of the constructional steel. The optimum technological regimes of ultrasonic treatment that provide maximum hardening without violation of the integrity surface were determined. It was shown that ultrasonic treatment increases the microhardness. Established that the surface hardening of steel is due to formation in the surface layer of the developed dislocation structure, grain refinement and microstresses.

Key words: ultrasonic treatment, steel, surface plastic deformation, microstructure, hardness.