

**5. Условия** предотвращения старения автолистовой стали 08Ю после непрерывного отжига / И.Г. Радионова [и др.]. // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 71–74.

**6. Бабич, В.К.** Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.

**7. Технология** производства труб: учебник для вузов / И.Н. Потапов [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 528 с.

**8. Шмитт-Томас, К.Г.** Металловедение для машиностроения / К.Г. Шмитт-Томас; пер. с нем. под ред. В.А. Скуднова. – М.: Металлургия, 1995. – 512 с.

*УДК 621.746*

**С.Ф. КУКИН (РУП «МТЗ»)  
Т.Н. СИНИЧЕНКО (БНТУ)**

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НОРМАЛИЗАЦИИ СТАЛИ 40Х**

**Введение.** Одним из перспективных способов интенсификации технологических процессов поверхностного упрочнения деталей, термической обработки сталей является воздействие мощного ультразвука. В основе указанных технологических процессов лежат такие физические явления, как движение межфазной поверхности, диффузия атомов [1]. Кинетика этих явлений сложна и определяется, в основном, характером распределения и взаимодействия дефектов кристаллической решетки типа дислокаций, вакансий и межузельных атомов друг с другом и с атомами примесей. Технологии с применением ультразвука при термической обработке металлов до последнего времени не находят широкого распространения в промышленности, хотя эффекты ультразвукового воздействия на изменение структуры металлов и сплавов при термической обработке весьма существенны [2].

Ниже приведены комбинированные виды термической обработки с использованием ультразвука [3]:

- собственно ультразвуковая обработка;
- предварительная ультразвуковая обработка;
- термоультразвуковая обработка (в том числе многократная);
- закалка в ультразвуковом поле;
- химико-термическая обработка с ультразвуком.

Почти все виды обработки металлов и сплавов с ультразвуком представляют собой микродеформационно-термическую обработку, поскольку непосредственное воздействие ультразвука на твердое вещество имеет деформационную природу процессов, которые, как и при ТЦО, развиваются в микрообъемах обрабатываемого материала, и оказывают влияние на структурные и фазовые превращения при термической обработке.

При ультразвуковой обработке в ряде случаев оказывается возможным получение ряда эффектов, недостижимых при традиционной термической обработке (например, уменьшение внутренних напряжений без применения разупрочняющего нагрева, деформационное изменение структуры и свойств материала без изменения размеров тела).

Наряду с повышением качества металлов и сплавов под действием ультразвука в ряде случаев происходит значительное сокращение длительности цикла термической обработки. Ультразвуковое воздействие может существенно увеличить скорость само- и гетеродиффузии и тем самым ускорить процессы растворения и выделения фаз на различных этапах термической обработки.

**Собственно ультразвуковая обработка.** В основе собственно ультразвуковой обработки лежат принципы непосредственного воздействия механических ультразвуковых колебаний большой мощности на тонкое кристаллическое строение металлов и сплавов, в том числе на концентрацию и конфигурацию распределения точечных дефектов, дислокационное строение и их субзерненную структуру.

Изменение тонкого кристаллического строения металлов при ультразвуковой обработке сопровождается изменением их физико-механических свойств с получением положительного эффекта, недостижимого другими известными способами обработки. Одним из характерных результатов ультразвуковой обработки является деформационное упрочнение металлов и сплавов под действием ультразвука без изменения формы и размеров деталей.

Первые сведения о наследственности ультразвукового воздействия приводятся в работе [2]. Установлено, что в металлическом образце, подвергнутом обработке ультразвуком, при последующей термической обработке без ультразвукового воздействия наблюдается интенсификация диффузионных процессов. Под действием ультразвуковых колебаний в структуре металлов и сплавов происходят процессы образования вакансий и микропор, сохраняющихся при последующей термической обработке и оказывающих влияние на механизмы и кинетику развивающихся при этом структурных превращений [3].

Основным структурным результатом воздействия собственно ультразвуковой обработки является изменение дислокационного строения металлов и сплавов под действием циклического многократного знакопеременного их нагружения механическими напряжениями ультразвуковой частоты [4, 5]. Основная доля поглощения энергии колебательного движения связана с преимущественной способностью дислокаций воспринимать энергию, подводимую извне. Это вызывает протекание в структуре металлов и сплавов процессов, вызывающих размножение и перемещение дислокаций, и повышение их плотности.

Основным результатом воздействия мощных ультразвуковых колебаний на структуру металлов и сплавов является усложнение его тонкого кристаллического строения, в том числе повышение плотности дислокаций и рост концентрации вакансий [6]. Это связано с тем, что в процессе перемещения линий дислокаций под действием ультразвуковой волны они пересекаются между собой с образованием порогов (ступенек). Ступенька, возникающая на линиях двух пересекающихся винтовых дислокаций, представляет собой короткий отрезок краевой дислокации с единственно возможной плоскостью скольжения, ориентированной таким образом, что ступенька может двигаться только вдоль дислокации, а не вместе с дислокацией. При этом экстраплоскость краевой дислокации должна либо укорачиваться, либо удлиняться. Для этого требуется постоянный приток вакансий или дислоцированных атомов. Если их нет (или недостаточно для полной перестройки экстраплоскости), то при «насильственном» перемещении ступеньки вместе с винтовой дислокацией вслед за ступенькой возникает «хвост» из дислоцированных атомов или вакансий.

Возникновение вакансий с энергетической точки зрения происходит легче, поэтому при перемещении пересеченных дислокаций под действием напряжений ультразвуковой волны вместе со ступеньками, обрабатываемый материал насыщается избыточным количеством вакансий. Вакансии и вакансионные образования весьма подвижны в металле, ускоряя развитие диффузионных процессов. Сами вакансии достаточно легко аннигилируют, однако некоторые вакансионные скопления могут оказаться весьма устойчивыми и сохраняться в металле длительное время, в том числе и при последующем технологическом нагреве, где проявляется наследственное влияние ультразвука.

Изучение влияния ультразвуковых колебаний на структуру и свойства металлов и сплавов представляет большой интерес при разработке прогрессивных методов термической обработки. Несмотря на значительное число работ [4, 5], посвященных влиянию ультразвука на металлы, к настоящему времени еще не выработана единая точка зрения на природу наблюдаемых явлений.

Имеются сторонники так называемой тепловой теории, согласно которой все многообразие воздействия ультразвука на структуру и свойства сплавов сводится к разогреву материала при ультразвуковой обработке (рисунок 1).



Рисунок 1 – Разогрев образца из стали 40Х при ультразвуковой обработке

Ряд исследователей [4] придерживается мнения, что специфика ультразвукового воздействия связана с возникновением при термоультразвуковой обработке градиента поля ультразвуковых напряжений, в котором возможно увеличение диффузионной подвижности атомов, изменение равновесной величины зародышей новой фазы и т.п.

В настоящей работе приведены результаты авторских исследований влияния ультразвуковой обработки на структурообразование и механические свойства конструкционной стали 40Х.

**Материалы и методики.** В экспериментах использовались образцы из отожженной стали 40Х сечением 10×10 мм и длиной 55 мм, изготовленные по ГОСТ 9454-78. Исследования проводили на РУП «МТЗ» в лаборатории лазерных и ультразвуковых технологий управления главного технолога.

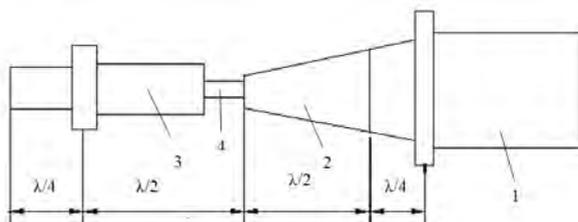
Рабочая зона установки ультразвуковой обработки представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Рабочая зона установки ультразвуковой обработки

Отметим два принципиально отличных способа подвода колебаний к исследуемому образцу. В работах [2–4] возбуждение ультразвука осуществлялось через жидкую промежуточную среду. Основным недостатком этого способа является то, что вследствие значительного отражения звука на поверхности жидкость – твердое тело, а также из-за развития кавитации практически невозможно достичь больших амплитуд напряжений в исследуемом образце. В данных исследованиях подведение ультразвуковой энергии к образцу осуществлялось непосредственным контактом через металлический концентратор. Эта схема позволяет достигнуть в образцах достаточно больших амплитуд напряжений (вплоть до разрушения). Наибольший эффект наблюдается, если образец имеет резонансную длину и вся колебательная система работает на собственной частоте.

Ультразвуковую обработку проводили с использованием магнитострикционного преобразователя (рисунок 3). Образец помещали между торцами возбуждающего и отражающего волноводов, рассчитанных в резонансе с колебательной системой преобразователя. В работе проводили исследования образцов, обработанных по следующим режимам: 1) без ультразвуковой обработки; 2) с ультразвуковой обработкой; 3) ультразвуковая обработка + нормализация; 4) нормализация. Структурные изменения в образцах оценивали, используя металлографический микроскоп, с помощью компьютерного метода проводили количественное описание микроструктур.



1 – магнитострикционный преобразователь (источник ультразвука) ПМС-15А-18;  
2 – концентратор; 3 – отражатель; 4 – образец

Рисунок 3 – Схема рабочей зоны ультразвуковой установки

**Результаты и обсуждение.** Многочисленные технологические применения мощного ультразвука при воздействии на твердое тело основаны на нелинейных эффектах, реализующихся при распространении этих колебаний в среде. Здесь в первую очередь следует сказать об изменении тонкой структуры кристаллов и явлениях, возникающих на границах раздела твердых тел.

Поглощение ультразвуковых колебаний определенным образом связано с внутренними процессами в твердом теле и, в частности, с эволюцией его дислокационной структуры. Проведенные к настоящему времени работы показали, что при обработке ультразвуковыми колебаниями с интенсивностью, превышающей определенный уровень кристаллических материалов, плотность дислокаций и концентрация точечных дефектов в них возрастают [4]. Механические свойства металлов и сплавов в большой степени определяются структурными несовершенствами, имеющимися в кристаллах: на

них оказывают существенное влияние атомы растворенных элементов, вакансии, дислокации, границы зерен и частицы второй фазы. Изменение дислокационной структуры материалов при ультразвуковом воздействии и развитие процессов микропластической деформации должно сказаться на механических свойствах материалов.

В работе проанализированы механические свойства образцов из стали 40Х. Существенного изменения твердости у образцов предварительно озвученных и не озвученных перед нормализацией не наблюдалось (таблица 1).

Таблица 1 – Механические свойства и микроструктура образцов из стали 40Х

Время озвучивания, мин	Механические свойства после нормализации	
	Твердость, НВ	Ударная вязкость, КСЧ, Дж/см <sup>2</sup>
Без ультразвуковой обработки (отожженный образец)		
–	217	201
С ультразвуковой обработкой		
1	229	177
10	229	225
Ультразвуковая обработка + нормализация		
1	112	–
4	110	–
10	112	98
Нормализация		
–	110	54

Наблюдается незначительное повышение твердости у образцов с УЗ по сравнению с неозвученными (рисунки 4, 5). При увеличении времени озвучивания ударная вязкость увеличивается с 177 Дж/см<sup>2</sup> до 225 Дж/см<sup>2</sup>. В исследуемых образцах при ультразвуковом воздействии повышаются характеристики пластичности и вязкости при одинаковой прочности. Ультразвук наиболее эффективен при малой продолжительности воздействия (до 10 мин). В дальнейшем эффективность ультразвука уменьшается вследствие того, что он распределяется в структуре более равномерно, а так же потому, что начинает сказываться его влияние на укрупнения зерна.

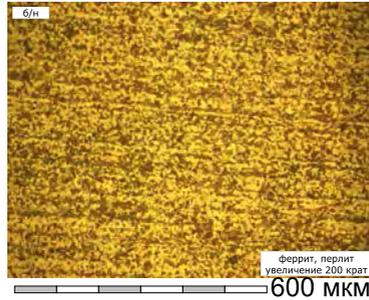


Рисунок 4 – Микроструктура стали 40X в отожженном состоянии

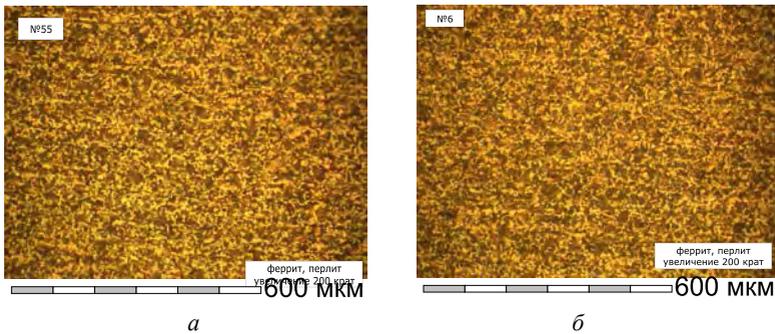


Рисунок 5 – Микроструктура стали 40X после ультразвуковой обработки с временем озвучивания 1 мин (а) и 10 мин (б)

Ультразвук, по-видимому, интенсифицирует процессы, прежде всего, в участках, где возникают значительные концентрации переменных напряжений. Такими участками в сплавах являются главным образом межкристаллитные слои, микротрещины, дислокации и другие несовершенства решетки. В этих участках за счет локального нагрева, а также знакопеременной деформации, интенсифицируются превращения, приводящие систему к более равновесному состоянию. В некоторых микротрещинах локальный нагрев, усиливаемый трением их стенок, может вызвать их оплавление.

В процессе озвучивания образцов наблюдался эффект разогрева. Тепловое воздействие ультразвука не отделено от действия переменных упругих напряжений, что очень важно для понимания механизма воздействия ультразвука на процессы диффузии и дисперсного твердения. Прохождение ультразвука по твердому телу

сопровождается рядом остаточных эффектов, таких, как интенсивный нагрев образцов, появление следов остаточной деформации, накопление усталостных изменений в структуре. Расчетным методом определено количественное описание микроструктур и балл зерна (таблица 2).

Таблица 2 – Количественное описание микроструктур стали 40X после ультразвуковой обработки с нормализацией

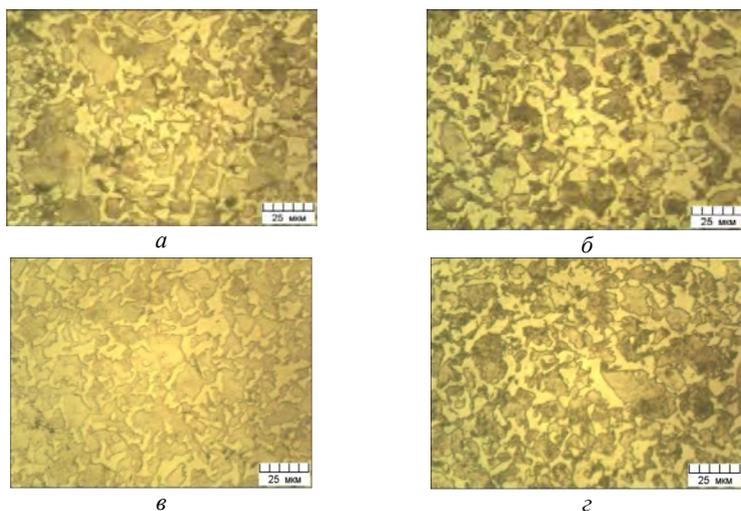
Время озвучивания, мин	Доля площади перлита, %	Доля площади феррита, %	Балл зерна
1	61,30	38,70	13-14
4	55,03	44,97	
10	61,84	38,16	
Без озвучивания	58,84	41,16	10-11

При охлаждении аустенита ниже температуры эвтектоидного равновесия  $A_{c1}$  происходит превращение, включающее в себя полиморфное  $\gamma$ - $\alpha$ -превращение и выделение графита или цементита [7]. Известно, что первый процесс связан с перестройкой кристаллической решетки атомов растворителя на границе раздела фаз. Второй процесс связан с диффузией углерода. Образование графита затруднено [7], поскольку требуются значительные флуктуации углерода, поэтому распад аустенита происходит с образованием феррита и цементита – перлитное превращение. Дефекты кристаллической решетки (дислокации, вакансии и др.), возникающие в аустените в результате внешних воздействий, влияют на кинетику перлитного превращения и морфологию его продуктов.

В микроструктуре озвученных образцов в сравнении с неозвученными обнаружен различный характер распределения феррита. Так, в неозвученных образцах феррит выделяется в виде сетки вокруг зерен перлита (рисунок 6, *з*), при наложении ультразвука видно много отдельных разноосных ферритных включений (рисунки 6, *а-в*). Ультразвуковые колебания влияют и на строение колоний перлита – у озвученных образцов они более дисперсны.

При введении ультразвуковых колебаний, возможно, изменяется кинетика полиморфного превращения и увеличивается плотность структурных несовершенств в обрабатываемом материале. Это, в свою очередь, интенсифицирует диффузионные процессы, что,

очевидно, может оказывать влияние на кинетику перлитного превращения и морфологию его продуктов.

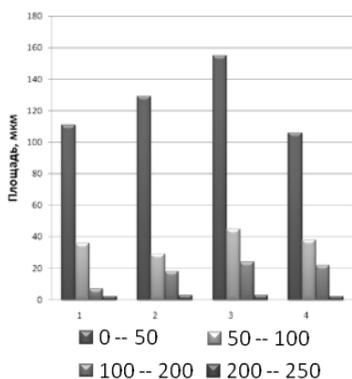


*а* – 1 мин; *б* – 4 мин; *в* – 10 мин; *г* – нормализация без ультразвука

Рисунок 6 – Микроструктура образцов из стали 40X после ультразвуковой обработки с нормализацией с различным временем озвучивания

Анализ перлитного превращения показывает, что степень дисперсности феррито-цементитной смеси определяется в основном не числом центров фазовой перекристаллизации, а главным образом термодинамическим стимулом превращения – разностью свободных энергий аустенита и перлита, а также скоростью диффузионных процессов отвода избыточных компонентов от перемещающейся границы растущей пластинки феррита или цементита в аустенитную матрицу при росте перлитных колоний. Величина межпластинчатого расстояния главным образом определяется последним фактором.

Установлено, что ультразвуковая обработка сталей в процессе фазовой перекристаллизации приводит к увеличению числа зародышей новой фазы и образованию более дисперсной структуры. Об этом свидетельствуют данные гистограмм, построенные по количественным характеристикам зерна (рисунки 7, 8).



Время озвучивания: 1 – 1 мин; 2 – 4 мин; 3 – 10 мин; 4 – без озвучивания

Рисунок 7 – Гистограмма площади зерна перлита

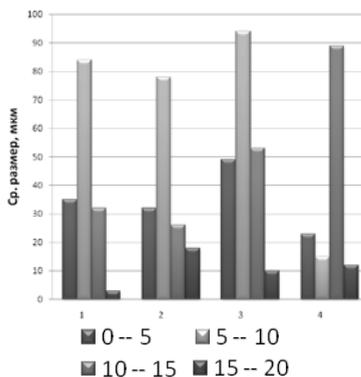


Рисунок 8 – Гистограмма среднего размера зерна перлита

По данным характеристикам балл зерна исследуемых образцов варьируется от 12 до 14.

**Заключение.** Ультразвуковые напряжения, возбуждаемые в стали 40Х при предварительном озвучивании с последующей нормализацией, вызывают повышение характеристик пластичности и вязкости при одинаковой прочности. Установлено, что предварительная ультразвуковая обработка с последующей нормализацией стали 40Х приводит к увеличению числа зародышей новой фазы и образованию более дисперсной структуры, с баллом зерна 12–14.

Ультразвук наиболее эффективен при малой продолжительности воздействия (до 10 мин). В дальнейшем эффективность ультразвука уменьшается вследствие того, что он распределяется в структуре более равномерно.

## Литература

1. **Абрамов, О.В.** Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О.В. Абрамов, В.И. Добаткин, В.Ф. Казанцев. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
2. **Погодина-Алексеева, К.М.** Применение ультразвука в производстве сплавов и их термической обработке / К.М. Погодина-Алексеева, В.С. Биронт, Л.Д. Славин. – М.: ЦП НТО МАШПРОМ, 1962. – С. 12–16.

3. **Биронт, В.С.** Применение ультразвука при термической обработке металлов / В.С. Биронт. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.

4. **Погодин-Алексеев, Г.И.** Применение ультразвука в металловедении и термической обработке металлов / Г.И. Погодин-Алексеев, В.С. Миротворский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1966. – № 9. – С. 2–7.

5. **Абрамов, О.В.** Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые материалы / О.В. Абрамов. – М.: Наука, 2000. – 312 с.

6. **Биронт, В.С.** Теория термической обработки металлов. Комбинированные методы: учебное пособие / В.С. Биронт. – Красноярск: СФУ: ИЦМиЗ, 2007. – 152 с.

7. **Новиков, И.И.** Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

*УДК 621.793*

**В.Н. КОВАЛЕВСКИЙ**, д-р техн. наук,  
**И.В. ФОМИХИНА**, канд. техн. наук,  
**А.В. КОВАЛЕВСКАЯ**, канд. техн. наук,  
**С.В. ГРИГОРЬЕВ**,  
**А.Е. ЖУК**,  
**Д.Г. САЧАВА** (БНТУ)

## **ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ПОРОШКОВ-КОМПОЗИТОВ С СОЕДИНЕНИЕМ ИХ ПАЙКОЙ ДИСИЛИЦИДОМ МОЛИБДЕНА**

**Введение.** Для ответственных деталей машиностроения и металлургии, работающих при наличии агрессивной среды, повышенных температур, давлений, прикладываемых циклически, используют материалы с защитным карбидокремниевым покрытием или композиты с пористым каркасом (общей пористостью до 53 %) из железного порошка с карбидокремниевой матрицей, что позволяет получать металлокерамические композиционные материалы с повышенной прочностью на сжатие ( $350 \pm 10$  МПа) [1]. Абразивные изделия на основе синтетических алмазов и карбида кремния получают пропиткой пористого алмазного полуфабриката жидким кремнием, что