АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXV 1989 Вып. 1

УДК 539.373.3

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Кулемин А. В., Михеев А. А.

Изучено влияние мощного ультразвука на рекристаллизацию холодно-деформированной стали. Показано, что при амплитудах деформаций выше некоторого порогового значения процесс рекристаллизации ускоряется, что связывается с перестройкой дислокационной структуры стали под действием ультразвука.

Известно, что воздействие ультразвука приводит к ускорению диффузии атомов замещения и внедрения [1, 2]. Известно также, что в процессе ультразвукового воздействия ускоряются такие диффузионные процессы, как перлитное превращение в сталях [3] и рекристаллизация в чистых металлах [4]. Однако исследования по воздействию ультразвука на рекристаллизацию сталей неизвестны. Тем не менее такие исследования представляют практический интерес с точки зрения ускорения и оптимизации процессов рекристаллизационного отжига и улучшения качества структуры некоторых классов сталей, например подшипниковых.

В настоящей работе исследовано влияние ультразвука на процесс рекристаллизации стали ШХ-15. Были приготовлены образцы из стали ШХ-15, предварительно деформированные на 20%, длиной 0,110 м и диаметром 0,016 м. По всей длине образцов были проточены две параллельные площадки для измерения твердости.

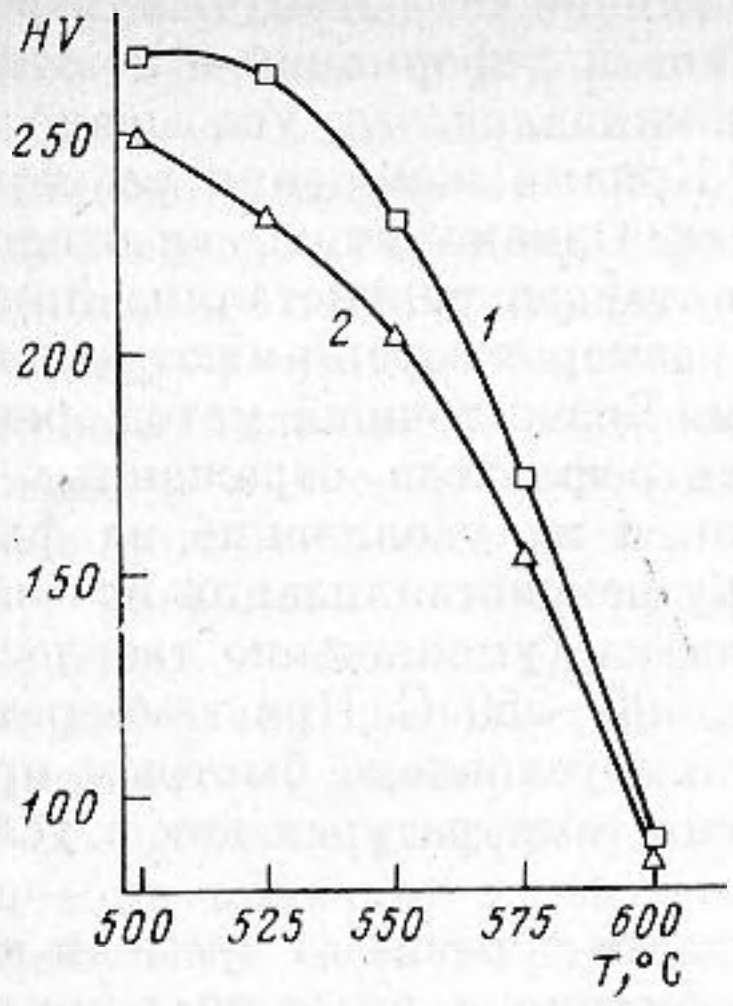
Обработка образцов осуществлялась по схеме, приведенной в работе [2]. Образец из стали ШХ-15, имеющий полуволновую длину для данной температуры, прикреплялся с помощью резьбы к волноводу, который возбуждался от ультразвукового магнитострикционного преобразователя. Величина амплитуды колебательных смещений измерялась электродинамическим датчиком [2]. Амплитуда деформации в каждой точке по длине образца x определялась как

$$\varepsilon_m = (2\pi/\lambda)\,\xi_m \sin\,(2\pi x/\lambda), \qquad (1)$$

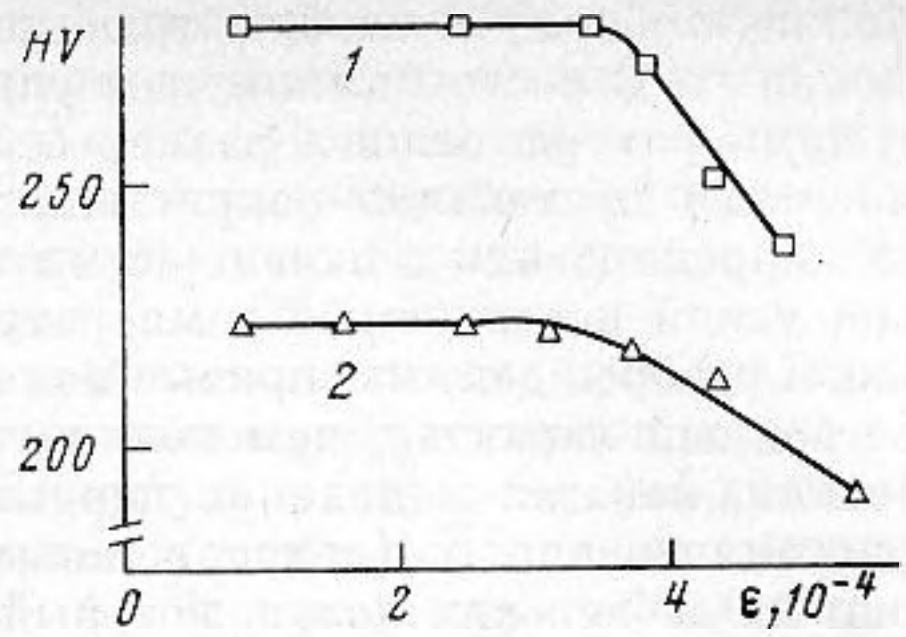
где ξ_m — максимальная амплитуда колебательных смещений; λ — длина волны в данном материале.

Частота измерялась частотомером Ч3-37. Нагрев образца до температур рекристаллизации проводился в печи с расплавом олова. Заданная температура расплава поддерживалась при помощи электронного терморегулятора ВРТ-3. Опыты проводились при различных температурах и различных временах выдержки. При установленной температуре в расплав олова, который находился в печи, погружался образец и подвергался воздействию ультразвука в течение фиксированного времени. При этом записывалась температура образца в пучности деформаций. Затем образец извлекался, а на его место помещался контрольный образец, который выдерживался при той же температуре в течение того же времени, но без воздействия ультразвука. После чего образцы остывали и измерялась их твердость. Причем твердость образца, подвергнутого воздействию ультразвука, измерялась через каждые 5 мм, начиная от свободного его конца. Увеличение температуры системы образец — жидкое олово вследствие рассеяния ультразвука зафиксировано незначительное ($\pm 1-2°$ C). Неравномерность распределения температуры по длине образца составляла тот же порядок.

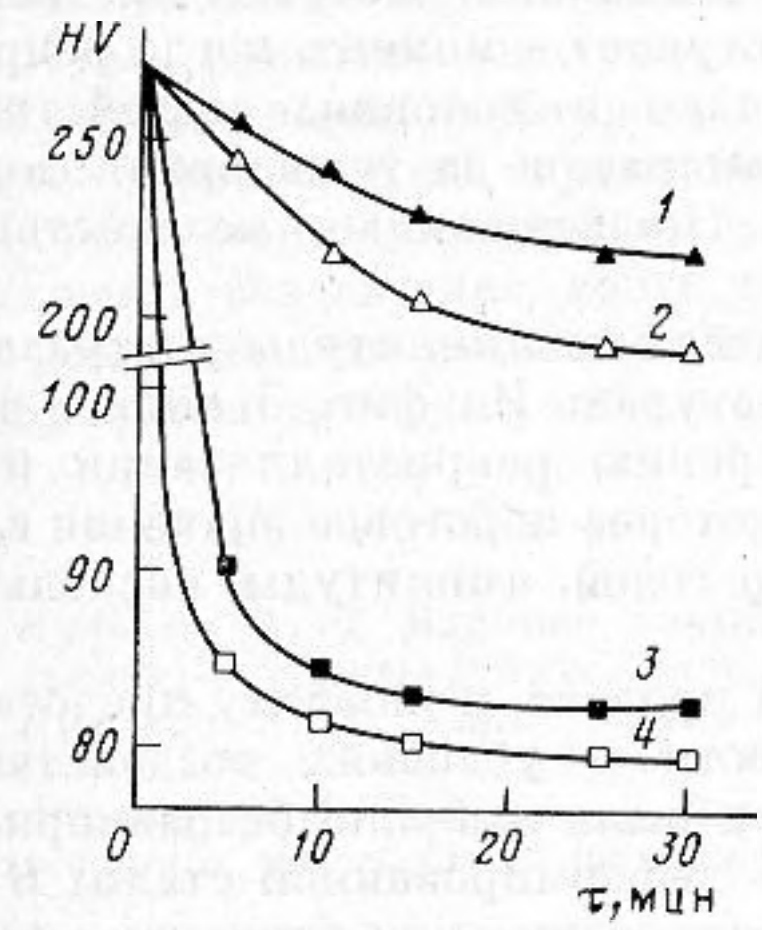
Кинетика рекристаллизации стали исследовалась металлографически,



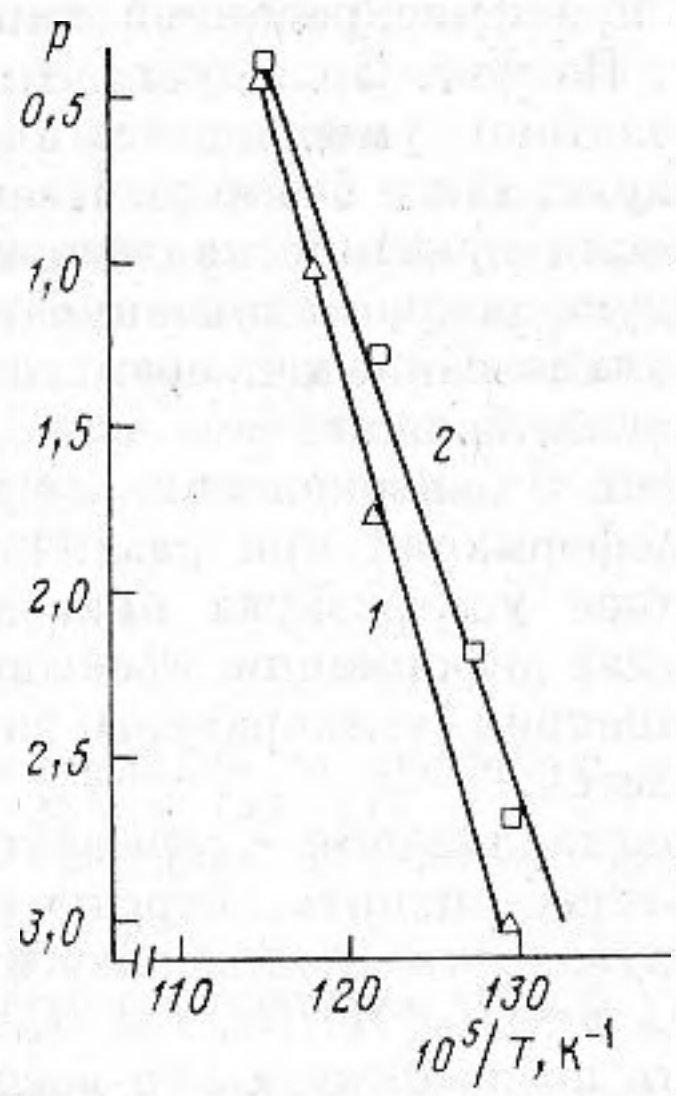
Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2



Фиг. 4

Фиг. 1. График зависимости твердости образца от температуры при времени выдержки 15 мин: *1* — без ультразвука, *2* — с ультразвуком, $\varepsilon_m=5{,}71\cdot10^{-4}$

Фиг. 2. График зависимости твердости образца от времени выдержки при $\varepsilon_m=5{,}71\cdot10^{4}$: *1* — без ультразвука, $T=550°$ С, *2* — с ультразвуком, $T=550°$ С, *3* — без ультразвука, $T=600°$ С. *4* — с ультразвуком, $T=600°$ С

Фиг. 3. График зависимости твердости образца от амплитуды деформации при времени выдержки 15 мин: *1* — температуре 500° С, *2* — температуре 550° С

Фиг. 4. График зависимости P от $1/T$ К$^{-1}$ при времени выдержки 15 мин: *1* — без ультразвука, *2* — с ультразвуком

рентгеновским методом и с помощью измерений твердости. Проводился анализ кривых распределения зерен по размерам и изменения их формы в процессе отжига с ультразвуковым воздействием и без воздействия.

На фиг. 1 представлена зависимость твердости образца от температуры при времени выдержки $\tau=15$ мин и амплитуде деформации $\varepsilon_m=5{,}71\cdot10^{-4}$. Из фиг. 1 видно, что в исследованном интервале температур твердость образца, подвергнутого воздействию ультразвука ниже твердости контрольного образца. Этот факт указывает на увеличение под воздействием ультразвука доли рекристаллизованных зерен, имеющих меньшую твердость, чем деформированные зерна [5].

В световом микроскопе удалось различить новые зерна, когда они увеличиваются до размеров 10—20 мкм. Рекристаллизованные зерна имели

правильную форму и слабую травимость в отличие от вытянутых деформированных. С ростом амплитуды ультразвуковой деформации и повышением температуры отжига размер зерна увеличивался, что указывало на интенсивное протекание рекристаллизации. Кривые изменения размеров зерен коррелировали с изменениями твердости. Однако, учитывая относительно узкий исследуемый температурный интервал рекристаллизации и большой разброс данных, кривые изменения размеров зерен имеют больше качественный характер, чем количественный. Более точный метод, рентгеновский, показал появление первых четких рефлексов, отраженных от рекристаллизованных (неискаженных) зерен, и их увеличение на фоне сплошных дебаевских колец, который к концу рекристаллизации исчезал.

Наибольший эффект воздействия ультразвука (уменьшение твердости на 50 ед. HV) достигается при температурах 500—550° С. При температурах 575—600° С и выше эффект исчезает, что обусловлено быстрым прохождением полной рекристаллизации при этих температурах как в условиях воздействия ультразвука, так и без него.

На фиг. 2 представлена зависимость твердости образца от времени выдержки при фиксированной амплитуде деформации и различных температурах. Из фиг. 2 следует, что с увеличением времени выдержки твердость монотонно уменьшается с выходом на насыщение как с воздействием ультразвука, так и без него. Насыщение наступает в момент, когда рекристаллизация практически завершается. Однако в условиях воздействия ультразвука рекристаллизация проходит быстрее, и за тоже время доля рекристаллизованных зерен в образцах, подверженных воздействию ультразвука, больше.

На фиг. 3 даны зависимости твердости стали от амплитуды ультразвуковых деформаций при различных температурах. Из фиг. 3 видно, что воздействие ультразвука приводит к ускорению рекристаллизации при амплитудах деформации, превышающих некоторое пороговое значение ε_{m1}. С повышением температуры значение пороговой амплитуды несколько уменьшается.

Рекристаллизация — термоактивируемый процесс и поэтому представляет интерес оценить энергию его активности в условиях воздействия ультразвука. Для оценки энергии активации была выбрана безразмерная величина $p=(H_0-H)/H_0$, где H_0 — твердость деформированной стали; H — твердость после отжига или воздействия ультразвука при фиксированной температуре. Эта величина определяет относительное уменьшение твердости в процессе рекристаллизации и поэтому характеризует кинетику этого процесса.

На фиг. 4 представлена зависимость $\ln p$ от $1/T$, где T — абсолютная температура отжига при рекристаллизации как в условиях воздействия ультразвука, так и без него. Из фиг. 4 следует, что в исследованном интервале температур 450—600° С величина экспоненциально зависит от $1/T$, т. е. процесс подчиняется закону Аррениуса. Можно также считать, что энергия активации рекристаллизации при воздействии ультразвука несколько меньше, чем энергия активации в контрольных образцах.

Скорость рекристаллизации в основном определяется двумя факторами: скоростью образования зародышей новых зерен и скоростью их роста. Последняя определяется скоростью перемещения границы. Обычно границы перемещаются в соответствии с диффузионным механизмом, который еще недостаточно изучен [7]. Полагаем, что скорость перемещения границ зерен определяется как [7]

$$V=Db^2W/kT, \qquad (2)$$

где D — коэффициент самодиффузии, b — вектор Бюргерса, W — энергия, накопленная при пластической деформации, которая одинакова для случая воздействия ультразвука и без воздействия, k — константа Больцмана, T — абсолютная температура отжига при рекристаллизации. Из [7] следует, что влияние ультразвука на рекристаллизацию (по скорости перемещения границ растущих зерен) может осуществляться только через воздействие на коэффициент диффузии D. Нами было получено, что воз-

действие ультразвука, при амплитудах выше некоторого порогового значения, приводит к ускорению диффузии атомов замещения и внедрения как в чистых металлах, так и в сталях [2]. Причем это увеличение коэффициента диффузии в 2—3 раза при максимальных амплитудах деформаций соответствует по порядку величины увеличению скорости рекристаллизации в деформированных сталях (см. (2)).

Следует так же отметить, что все особенности влияния ультразвука на рекристаллизацию в деформированных сталях объясняются через обнаруженные ранее особенности воздействия ультразвука на диффузию атомов в металлах, в частности уменьшение порогового значения амплитуды ε_{m1} с повышением температуры (фиг. 3). Поэтому, можно полагать, что в основе воздействия ультразвука на такие процессы в твердых металлах, как диффузия, фазовые превращения и др. [3], а также и рекристаллизация лежит единая природа.

Воздействие ультразвуковых деформаций выше некоторого порогового значения приводит к движению, взаимодействию и размножению дислокаций, что в свою очередь вызывает образование дополнительной концентрации вакансий, пересыщение ими кристаллической решетки. В результате ускоряется диффузия атомов и, следовательно, перемещение границ зерен при рекристаллизации деформированных металлов.

Итак, показано, что воздействие ультразвуковых деформаций при амплитудах выше некоторого порогового значения, которое уменьшается с ростом температуры, приводит к ускорению процесса рекристаллизации деформированных сталей, кинетика рекристаллизации в условиях ультразвукового воздействия соответствует кинетике диффузии атомов в этих же условиях, что указывает на единую природу воздействия ультразвука на процессы в твердых металлах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кулемин А. В.* Влияние ультразвуковых деформаций на диффузию в системе железо — углерод // Акуст. журн. 1971. Т. 18. № 4. С. 613—615.
2. *Кулемин А. В.* Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 199 с.
3. *Абрамов О. В., Добаткин В. И., Казанцев В. Ф., Кулемин А. В. и др.* Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 271 с.
4. *Hayes G. A., Shyne J. C.* Ultrasonic enhancement of grain growth in cooper // Phil. Mag. 1968. V. 17. № 148. P. 859—863.
5. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. М.: Металлургия, 1983. 326 с.
6. *Горелик С. С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1967. 403 с.
7. *Фридель Ж.* Дислокация. М.: Мир, 1967. 643 с.

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина

Поступила в редакцию 7.IX.1987