

УДК 669.04:539.097

В.П. Алехин

Московский государственный индустриальный университет

ПОЛУЧЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР В СТАЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

Ультразвуковая обработка (УЗО) материалов основана на использовании энергии механических колебаний инструмента-индентора. Колебания амплитудой 5 – 50 мкм совершаются с ультразвуковой частотой 20 кГц. Энергия в зону обработки вводится посредством статического усилия прижима инструмента к поверхности обрабатываемой детали. Технологическое оборудование для ультразвуковой обработки имеет постоянную структуру независимо от физико-механических свойств обрабатываемых металлов: источник питания, аппаратура управления процессом обработки, механическая колебательная система, привод давления. Схема установки для УЗО представлена на рис. 1.

Как показывают исследования, на состояние поверхности обработанной детали (шероховатость, твердость и др.) большое влияние оказывают статическая нагрузка (сила $P_{ст}$, прижимающая инструмент к детали), амплитуда смещения A , частота колебаний f , размеры и форма инструмента. Сила $P_{ст}$ обеспечивает акустический контакт инструмента и обрабатываемой детали; амплитуда и частота определяют максимальную скорость деформирования поверхностного слоя обрабатываемой детали и интенсивность ультразвуковой волны. Число ударов n инструмента на 1 мм² обрабатываемого материала при УЗО составляет $n = 60f/(vS)$, где

f – частота, кГц; v – окружная скорость, мм/мин; S – подача, мм/об. При соответствующем подборе значений параметров v и S число ударов на 1 мм² достигает 5000 – 7000. Исследование структуры материалов после УЗО проводили на трансмиссионном электронном микроскопе EM2010 высокого разрешения с увеличением более 10⁶ (рабочее напряжение 200 кВ).

Методом электронной микроскопии высокого разрешения показана возможность получения нанокристаллической структуры с размером зерен 5 – 10 нм (рис. 2) на любых массивных деталях из закаленной стали 4X5МФ1С на глубине $h = 15 \div 20$ мкм от поверхности (рис. 3) и субмикрокристаллической структуры на глубине 250 – 300 мкм от поверхности обработанного материала. При этом наблюдается увеличение твердости от исходного уровня HRC 48 – 50 до HRC 62 – 64, а в ряде случаев до HRC 69 – 70.

Учитывая, что до настоящего времени проблема получения нанокристаллических структур с соответствующим повышением уровня физико-механических свойств на массивных деталях еще не решена, полученные результаты являются весьма нетривиальными. При использовании компьютеризированной ультразвуковой технологии возможно получение очень тонкой нанокристаллической структуры на глубине 15 – 20 мкм деталей любых размеров и любой геометрии. Подобная нанокристаллическая структура с размером зерен 5 – 7 нм и резким повышением твердости получена на

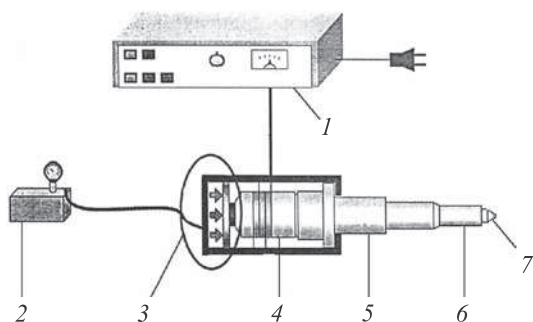


Рис. 1. Схема установки для ультразвуковой упрочняющей обработки с пьезокерамическим преобразователем:

1 – ультразвуковой генератор; 2 – воздушный компрессор для обеспечения статической нагрузки на инструмент; 3 – механизм регулировки усилия, обеспечиваемого пневмосистемой; 4 – пьезокерамический преобразователь; 5 – бустер; 6 – волновод; 7 – рабочий инструмент

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № П545 в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

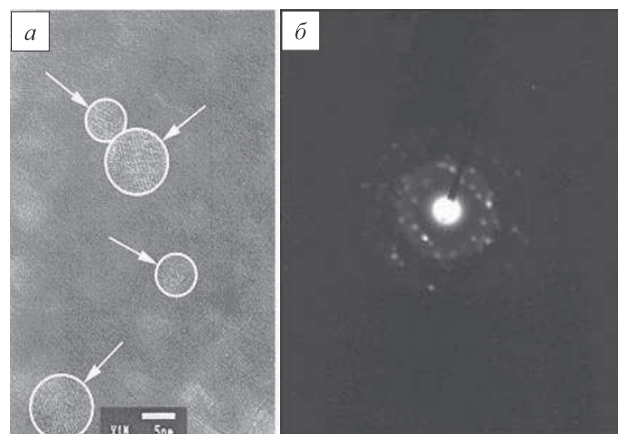


Рис. 2. Выявленная методом электронной микроскопии высокого разрешения ($\times 10^6$) нанокристаллическая структура стали 4X5МФ1С после ультразвукового упрочнения (с разрезанием атомных рядов) (а) и микроэлектроннограмма (б)

массивной детали при обработке вала прокатного стана диам. 800 мм длиной 1500 мм массой 5200 кг.

Разработанный метод ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки металлических материалов позволяет получить 10 – 12 класс чистоты поверхности любых массивных деталей (валов прокатных станов, штампов, плунжеров и др.) с одновременным ее упрочнением по сравнению с исходным состоянием за счет получения нанокристаллических структур с размером зерна 5 – 10 нм на глубине 15 – 20 мкм и микрокристаллических структур на глубине до 250 – 300 мкм от поверхности, что существенно повышает твердость, прочность, износостойкость и ресурс работы различных деталей и узлов.

Изменение структуры от поверхности в глубину материала после ультразвуковой обработки представлено на рис. 3. Для стали 4X5МФ1С, имеющей после закалки твердость HRC 46 – 48, ультразвуковая обработка повышает твердость до HRC 62 – 64. Для ряда других инструментальных материалов с исходной твердостью HRC 54 – 55, ультразвуковая обработка поднимает твердость до HRC 69 – 71. При этом шероховатость R_a снижается до 0,05 – 0,08 мкм, уменьшается коэффициент трения более чем в два раза, увеличивается износостойкость деталей. В поверхностных слоях на глубине до 150 – 200 мкм возникают остаточные напряжения сжатия, резко повышающие предел хрупкой и усталостной прочности. Процессы рекристаллизации при такой обработке практически заторможены, поскольку обработка ведется с охлаждением смазочно-охлаждающих жидкостей.

В приповерхностных слоях подвергнутого УЗО материала наблюдается градиент плотности дислокаций и остаточных напряжений до глубины 150 – 200 мкм. С точки зрения термодинамики 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. Осаждающиеся на дислокации быстро диффундирующие примеси внедрения (углерод, азот) приводят к более жесткому их закреплению, то есть к дополнительному упрочнению поверхностного слоя.

Практическая значимость этого явления характеризуется тем, что обнаруживается аномально высокое дополнительное упрочнение поверхностных слоев, выражающееся в двух-трехкратном росте микротвердости на глубине до 1 мкм при содержании в малоуглеродистой стали 0,08 – 0,10 % С. С ростом глубины слоя и увеличением содержания углерода в стали отмеченная аномалия постепенно исчезает. Кроме того, непосредственно в процессе поверхностной упрочняющей обработки приповерхностные слои обрабатываемого материала будут испытывать циклические нагрузки

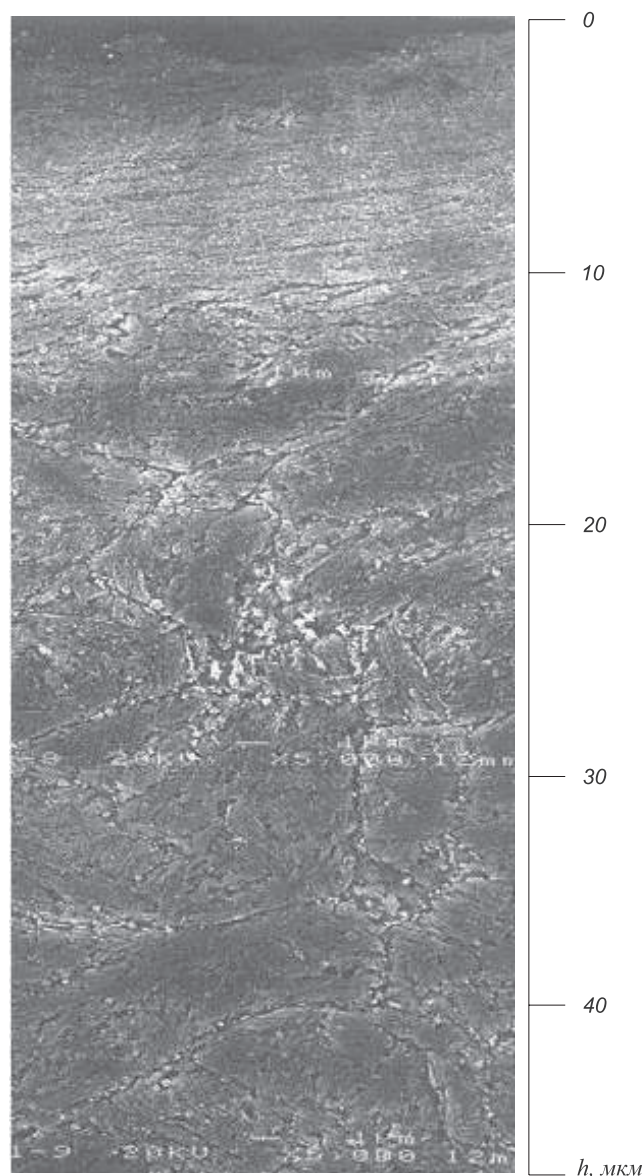


Рис. 3. Изменение структуры стали 4X5МФ1С после ультразвуковой обработки от поверхности (верх рисунка) в глубину материала

(сжатие-разгрузка) по мере прохождения инструмента по поверхности образца. При этом будет меняться энергия упругого взаимодействия примесного атома с данным участком кристаллической решетки. Согласно данным работ [1, 2] в этом случае можно ожидать реализации механизма «диффузионной накачки» примесей внедрения в приповерхностные слои обрабатываемого материала. Важной особенностью в понимании физической природы и механизмов деформационного старения является то, что в спектре стопоров, закрепляющих дислокации по механизму Коттрелла, возможно наличие не только примесных атомов внедрения (С, N, О, Н), но и собственных точечных дефектов, вакансий и междоузлий, которые, осаждаясь на винтовых компонентах дислокаций, образуют неконсервативно движущиеся ступеньки, являющиеся при движении дислокаций не менее эффективными стопорами, чем примесные

атомы. Собственные точечные дефекты (вакансии и междоузлия) также могут действовать и закреплять дислокации как в режиме постоянно действующего диффузионного потока, макроскопически направленного из объема кристалла к его поверхности, так и в режиме «диффузионной накачки» [1, 2] непосредственно в процессе поверхностной упрочняющей обработки, о чем уже упоминалось выше применительно к подсистеме примесных атомов внедрения.

Основным аргументом в пользу предлагаемого подхода по учету в механизме закрепления дислокационной структуры не только примесей внедрения, но и собственных точечных дефектов (вакансий и междоузлий) является тот факт, что, как известно [1, 2], потенциальный рельеф кристаллической решетки с линейными дефектами в ОЦК металлах обладает следующей особенностью. В этих металлах напряжение Пайерлса для винтовой дислокации приблизительно в 10^3 раз больше, чем для краевой. Поскольку энергия активации образования двойного перегиба пропорциональна корню квадратному из напряжения Пайерлса, должна наблюдаться приблизительно 30-кратная разница в энергиях активации образования двойного перегиба на краевой и винтовой дислокациях, что, как следствие, ведет к значительно большей скорости движения краевых компонент по сравнению с винтовыми. При этом последовательность стадий движения дислокаций в области микродеформации может быть следующей: движение геометрических перегибов; образование двойных перегибов на всех краевых компонентах; окончание микродеформации и начало макроскопического течения с образованием двойных перегибов на винтовых компонентах дислокаций.

Таким образом, при проведении поверхностной упрочняющей обработки (как и вообще в случае общей деформации ОЦК металлов выше предела текучести) следует ожидать явления быстрого истощения наиболее подвижных краевых компонент дислокационной структуры и накопления преимущественно винтовых компонент [1, 2]. Данные по прямому наблюдению дислокационной структуры с помощью просвечивающей электронной микроскопии четко подтверждают указанную закономерность. При действии постоянного или циклического (в случае «диффузионной накачки») диффузионного потока вакансий и междоузлий к стокам в виде винтовых дислокаций на последних образуются неконсервативно движущиеся ступеньки. Поскольку при движении таких винтовых дислокаций со ступеньками требуется диффузионный подвод или отвод вакансий или междоузлий (в зависимости от знака ступень-

ки), такой вид закрепления дислокационной структуры является не менее эффективным, чем примесными атомами внедрения.

Разработана технология поверхностной упрочняющей ультразвуковой обработки массивных деталей из закаленных конструкционных и инструментальных сталей для получения высокой твердости и прочности за счет создания нанокристаллических структур с размером зерна 5 – 10 нм на глубине 15 – 20 мкм от поверхности и микrokристаллической структуры на глубине 250 – 300 мкм от поверхности. При этом наблюдается увеличение твердости от HRC 44 – 46 до HRC 54 – 56, а в ряде случаев до HRC 68 – 70. Методом рентгеновского анализа исследован характер распределения внутренних остаточных напряжений от поверхности в глубину подвергнутых ультразвуковой обработке материалов. Уровень внутренних сжимающих напряжений составляет 800 – 850 МПа на глубине до 150 мкм от обработанной УЗО поверхности.

Исследован предел усталостной прочности закаленной штамповой стали 4Х5МФ1С на базе 10^7 циклов нагружения, показано, что после УЗО предел усталостной прочности увеличивается в два раза (с 650 до 1150 МПа).

Технология ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки отработана на широком круге реальных промышленных деталей и изделий с различной геометрической формой поверхности (цилиндрической, сферической, тороидальной, винтовой, и другой, более сложной формой, например, авиационных турбинных лопаток, штампов и др.) за счет применения компьютеризированной технологии. При этом общие размеры и масса обрабатываемых деталей в ряде случаев достигали весьма значительных величин.

Выводы. При использовании ударных контактных воздействий инструмента с ультразвуковой частотой и сферическим наконечником возможно получение нано- и субмикrokристаллических структур при обработке конструкционных и инструментальных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехин В.П., Боровин Ю.М., Жаркий С.М. и др. – В кн.: Сб. докладов Международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем – 2003». Т. 1. – Ростов-на-Дону, 2003. С. 35 – 38.
2. Алехин В.П., Пьен Й.С., Ким Ч.С., Сонг Й.В. – В кн.: Сб. науч. тр. Международной конференции «Новые перспективные материалы и технология их получения – 2004». Т. 1. – Волгоград, 2004. С. 22 – 24.

© 2012 г. В.П. Алехин
Поступила 31 января 2012 г.