

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. Лесюк

Электростальский политехнический институт
Московского института стали и сплавов (технологического университета)
elena-lesyuk@yandex.ru

Проблема получения наноструктуры в объемных конструкционных материалах относится к числу приоритетных направлений не только в России, но и во всем мире, поскольку это путь создания принципиально нового класса материалов с повышенными физико-механическими и новыми функциональными свойствами. По сравнению с наноматериалами для других приложений, например таких, как электроника, информатика, медицина, конструкционные наноматериалы достаточно трудно внедряются в практику. Анализ показывает, что причинами данной ситуации являются высокая сложность и стоимость существующих методов получения наноматериалов, их низкая производительность, трудность получения длинномерных изделий с регламентированным размером зерен от поверхности к центру изделия.

В ряде работ было показано, что поверхностную упрочняющую ультразвуковую обработку (УЗО) можно отнести к методам получения поверхностных наноструктур интенсивной пластической деформацией [1–3]. Интенсивность деформационного воздействия достаточно велика – ультразвуковой инструмент производит порядка 6–10 тысяч ударов на квадратный миллиметр. Этот метод позволяет создавать наноструктурное состояние в поверхностном слое обрабатываемого материала и обеспечивает градиентное изменение его свойств по глубине модифицированного слоя.

УЗО основана на использовании энергии механических колебаний инструмента – индентора. Колебания совершаются с ультразвуковой частотой 20 кГц и амплитудой колебаний 0,5–50 мкм. Энергия в зону обработки вводится посредством статического усилия прижима инструмента к поверхности обрабатываемой детали. Стандартное технологическое оборудование для ультразвуковой обработки имеет постоянную структуру независимо от физико-механических свойств обрабатываемого металла: источник питания, аппаратура управления процессом обработки, механическая колебательная система, привод давления (рис. 1).

Технология УЗО позволяет обрабатывать изделия любых размеров с различными конструктивными формами поверхностей (цилиндрические наружные и внутренние, торцовые, конические, шаровые), выступы и радиусные канавки. Использование технологии УЗО исключает ручной труд, необходимость применения абразивных материалов; упрощает технологический процесс и исключает применение некоторых типов станков (например, шлифовальных); уменьшает объемы внутрицеховой транспортировки деталей; экономит производственные площади, электроэнергию, трудозатраты; снижает необходимые припуски размеров в технологических операциях.

Нами выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, позволивший преобразовать стандартную технологию УЗО в новую технологию обработки деталей любых размеров из конструкционных и инструментальных сталей со сложной геометрической формой. Технологическая схема УЗО дополнена специальной системой охлаждения обрабатываемой детали, обеспечивающей термическую стабильность формируемых в процессе обработки нано- и субмикроструктур. Разработанная технология, основанная на применении УЗО, позволяет решить традиционно актуальные задачи машиностроения – существенное (на десятки процентов) повышение прочности, износостойкости, долговечности деталей практически любой формы и геометрии. Кроме того, она позволяет получать новые функциональные характеристики упрочненных материалов – в частности, снижение их водородопроницаемости за счет формирования поверхностного силоводеформированного слоя с высокими остаточными напряжениями и пониженными адсорбционными свойствами.

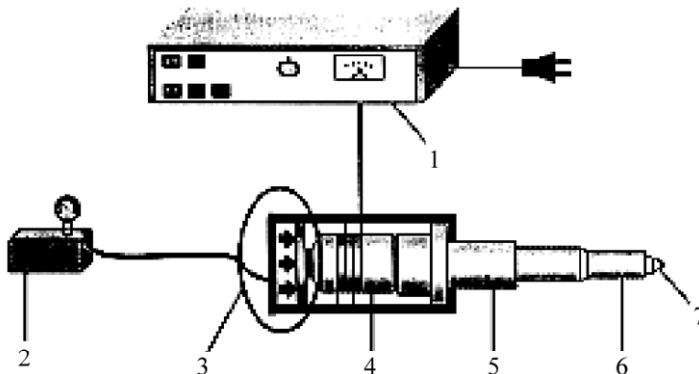


Рис. 1. Схема установки для УЗО: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – воздушный компрессор для обеспечения статической нагрузки на инструмент; 3 – механизм регулировки усилия, обеспечиваемого пневмосистемой; 4 – пьезо- или магнитострикционный преобразователь; 5 – бустер; 6 – волновод; 7 – рабочий инструмент

Надо отметить, что помимо традиционных для машиностроения конструкционных и инструментальных сталей, таких как 4Х5МФ1С, Ст 3, сталь 45, У8, У12, 9ХС, Р18, 9ХС, ШХ 15, нами рассмотрено влияние УЗО на свойства сплава с памятью формы никелида титана, являющегося наиболее перспективным материалом машиностроения будущего. Однако уже сейчас его использование позволяет решать некоторые задачи машиностроения. Такой материал, обладающий способностью к возврату деформаций, можно запрограммировать на довольно сложные движения и тем самым на совершение исполнительных функций почти неограниченной степени сложности. Совмещение блока, содержащего такой сплав, с кинематическими механизмами делает перспективным создание принципиально новой аппаратуры. Свойство создавать значительные реактивные усилия служит основой при проектировании малогабаритных прессов. Еще одна область применения касается создания плотных и неразъемных соединений в условиях, когда невозможно применение традиционных технологий.

Изучение структуры исследуемых материалов проводилось на трансмиссионном электронном микроскопе высокого разрешения EM2010. Для определения микротвердости использовался микротвердомер "Struers". Усталостные испытания образцов, а также эксперименты по изучению прочности и пластичности, проведены на испытательных машинах "Instron". Измерения коэффициента трения на поверхности до и после УЗО проводились на специальной испытательной машине фирмы R&B. Величину параметра шероховатости поверхности R_a определяли профилометром Dektak 150. Величины остаточных напряжений в материале после УЗО определялись методом рентгеновской дифракции по изменению параметра решетки, который получали экспериментально, и далее по этому измерению проводился расчет остаточных напряжений, принимая линейное упругое искажение кристаллической решетки.

При отработке новой технологии проведены экспериментальные исследования влияния основных технологических параметров УЗО (амплитуды колебаний индентора $2A$, статического усилия (силы, прижимающей ультразвуковой инструмент к образцу) $P_{ст}$, окружной скорости обрабатываемых образцов V , величины подачи инструмента S , диаметра индентора сферической формы $D_{ш}$) на величину параметра шероховатости R_a и микротвердость поверхности образцов (рис. 2–3). Обработка цилиндрических образцов диаметром 20 мм производилась на токарном станке, на суппорте которого фиксировался ультразвуковой инструмент. Исходная величина параметра шероховатости поверхности R_a 20 мкм.

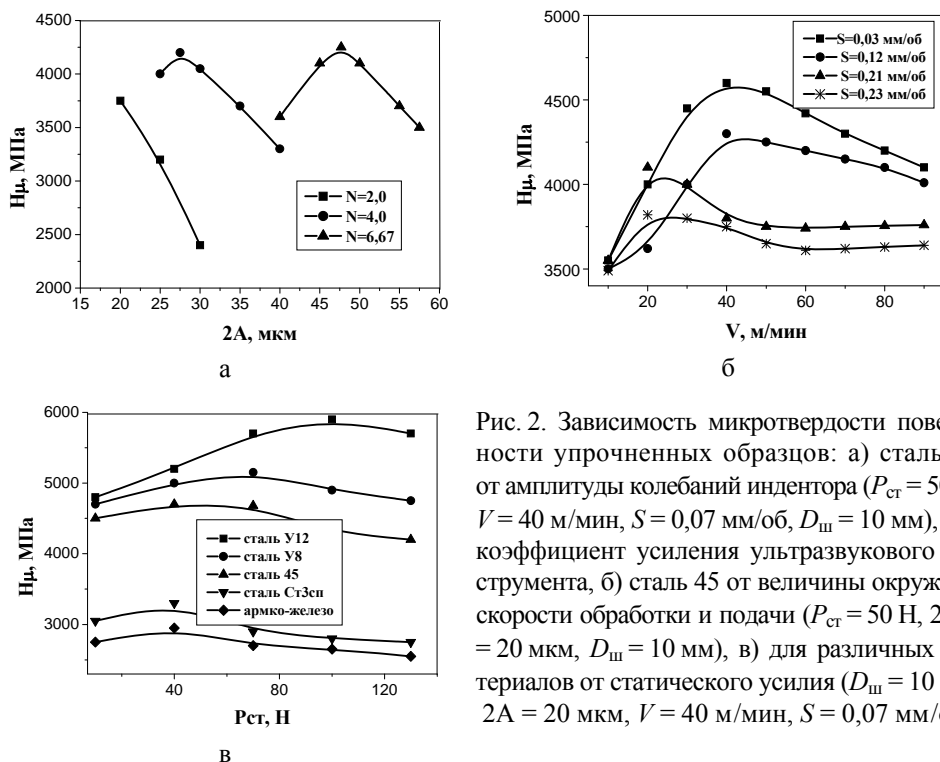


Рис. 2. Зависимость микротвердости поверхности упрочненных образцов: а) сталь 45 от амплитуды колебаний индентора ($P_{ст} = 50$ Н, $V = 40$ м/мин, $S = 0,07$ мм/об, $D_{ш} = 10$ мм), N – коэффициент усиления ультразвукового инструмента, б) сталь 45 от величины окружной скорости обработки и подачи ($P_{ст} = 50$ Н, $2A = 20$ мкм, $D_{ш} = 10$ мм), в) для различных материалов от статического усилия ($D_{ш} = 10$ мм, $2A = 20$ мкм, $V = 40$ м/мин, $S = 0,07$ мм/об)

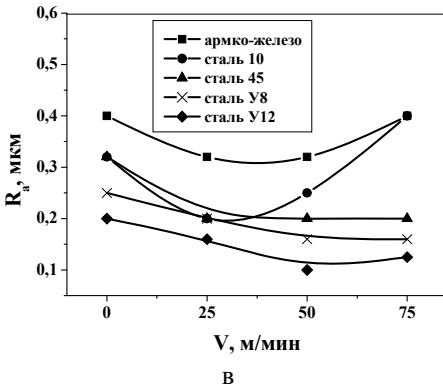
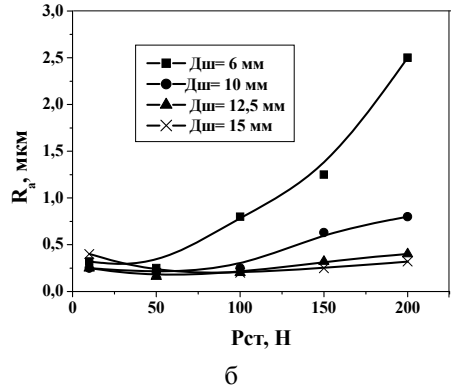
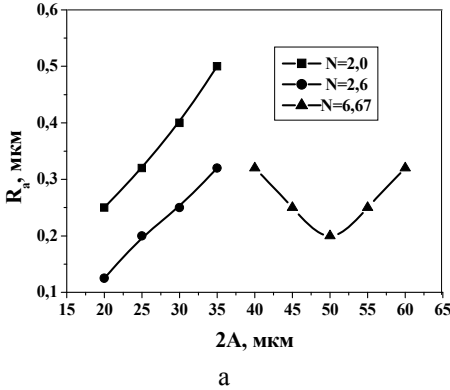


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости R_a поверхности упрочненных образцов: а) сталь 45 от амплитуды колебаний индентора ($P_{ст} = 50$ Н, $S = 0,07$ мм/об, $V = 40$ м/мин, $D_{ш} = 10$ мм), б) сталь 45 от статического усилия при различных диаметрах шара ($S = 0,07$ мм/об, $V = 40$ м/мин, $2A = 20$ мкм), в) от марки упрочняемого материала при различных скоростях вращения детали ($P_{ст} = 50$ Н, $2A = 20$ мкм, $S = 0,07$ мм/об, $D_{ш} = 10$ мм)

Установлено, что зависимости микротвердости и параметра шероховатости R_a обработанной поверхности от величины основных технологических параметров имеют две области, разделенные экстремумами – максимум для микротвердости и минимум для величины микрогеометрии. В зоне до экстремумов наблюдается уменьшение величины R_a и повышение микротвердости при росте $2A$, $P_{ст}$, S , V , $D_{ш}$. При дальнейшем аналогичном изменении указанных технологических параметров наблюдается обратная зависимость – рост величины микрогеометрии и уменьшение микротвердости вследствие появления эффекта переупрочнения и контактной усталости обрабатываемого материала, сопровождающегося появлением в приповерхностных слоях большого количества микротрещин.

Важно отметить, что УЗО выполняет функции не только упрочняющей, но и финишной обработки поверхности, когда величину параметра шероховатости R_a можно довести до долей микрометра. При этом весьма ценным является то обстоятельство, что данный способ позволяет получать регламентированную шероховатость поверхности, когда размер, форму и общую плотность "масляных карманов" и соответственно маслосъемность поверхности можно целенаправленно регулировать, изменяя в соответствующих пределах технологические параметры процесса.

На основании представленных исследований рекомендованы следующие параметры УЗО конструкционных материалов: при фиксированных частоте 20 кГц, амплитуде колебаний инструмента 20 мкм, диаметре шарика индентора 10 мм

рекомендуется использовать скорость обработки от 35 до 40 м/с, статическое усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности для арможелеза и мягких сталей от 50 до 150 Н, для твердых – от 100 до 200 Н, подача инструмента не более 0,7 мм/об.

Результаты экспериментальных исследований воздействия УЗО на структуру и физико-механические свойства инструментальной штамповой стали 4Х5МФ1С представлены на рис. 4–8. Технологические параметры процесса обработки: $P_{ст} = 100$ Н, $2A = 20$ мкм, $D_{ш} = 10$ мм, $N = 6,67$, $S = 0,07$ мм/об, $V = 40$ м/мин, охлаждение СОЖ.

Методом просвечивающей микроскопии высокого разрешения показана возможность получения при УЗО нанокристаллической структуры с размерами 5–10 нм на поверхности массивных деталей из стали 4Х5МФ1С на глубине до 20 мкм и субмикроструктуры на глубине до 250–300 мкм от поверхности обработанного материала. При этом наблюдается возрастание микротвердости с исходного уровня 4800–5000 до 6200–6400 МПа (рис. 4).

Экспериментально показано, что у стали 4Х5МФ1С в поверхностных слоях на глубинах до 150–200 мкм возникают остаточные напряжения сжатия, резко повышающие предел хрупкой и усталостной прочности. Уровень внутренних сжимающих напряжений составляет 600–800 МПа на глубине до 150 мкм от обработанной УЗО поверхности. Далее он постепенно спадает, но сохраняет величину порядка 200–400 МПа до глубины 250–300 мкм (рис. 5).

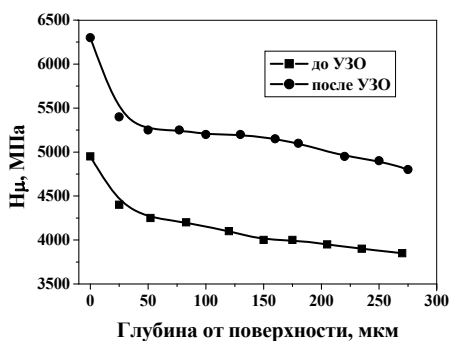


Рис. 4. Изменение микротвердости стали 4Х5МФ1С от свободной поверхности в глубину образца до и после УЗО

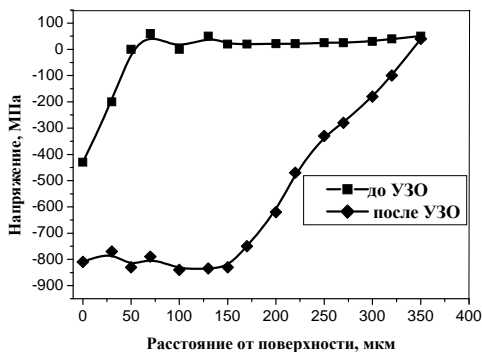


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений от свободной поверхности в глубину образца из стали 4Х5МФ1С

Исследован предел усталостной прочности стали 4Х5МФ1С на базе 10^7 циклов, и показано, что после УЗО он увеличивается почти в 2 раза с 650 (до УЗО) до 1150 МПа (рис. 6). После УЗО коэффициент трения понижается более чем в 2 раза (рис. 7). Методом горячей микротвердости установлено, что порог термической стабильности полученной после УЗО нано- и субмикроструктуры составляет 450–500 °С (рис. 8). Выше этой температуры размер зерна структуры растет за счет протекания процесса рекристаллизации, а уровень физико-механических свойств соответственно снижается.

Исследовано влияние УЗО на структуру и механические свойства никелида титана в крупнозернистом закаленном состоянии. Результаты исследований микроструктуры поверхности показали, что в процессе УЗО формируется ультрамелкозернистая структура, включающая обширные области с наноструктурным состоянием сплава: полученные изображения состояли в основном их фрагментов размерами 100 нм и менее. Установлено, что микротвердость образцов после УЗО увеличивается от 2000 (в исходном сплаве) до 3200 МПа. Лучшие показатели по микротвердости получили на образцах при обработке с $P_{ст} = 50$ Н. При этом толщина упрочненного слоя, оцененная по изменениям величины отпечатков пирамидки Виккерса при увеличении нагрузки на него, составляет не менее 8–9 мкм (на этой глубине H_{μ} уменьшилась примерно на 10 %).

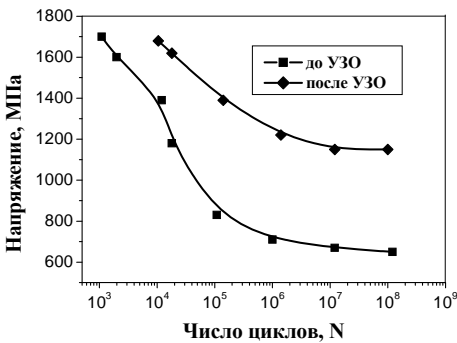


Рис. 6. Кривые усталостной прочности стали 4Х5МФ1С до и после УЗО

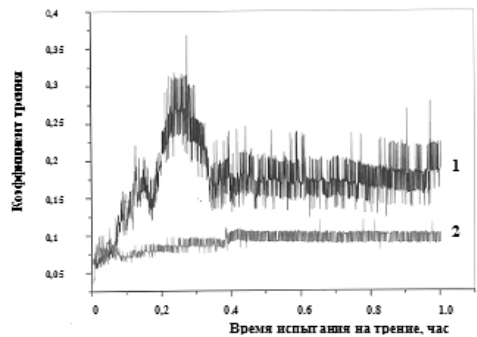


Рис. 7. Изменение коэффициента трения стали 4Х5МФ1С от времени испытания (1 – до УЗО, 2 – после УЗО)

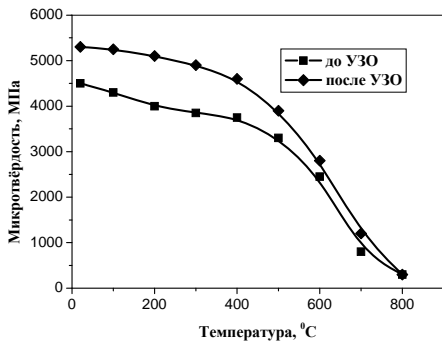


Рис. 8. Зависимость микротвердости стали 4Х5МФ1С от температуры нагрева до и после УЗО

Проведены испытания механических свойств никелида титана на растяжение. Исследованы образцы до и после УЗО ($P_{ст} = 100$ Н). Установлено, что процесс упрочнения поверхности никелида титана ничем не отличается от процесса упрочнения сталей с соответствующим начальным уровнем твердости. Результаты исследований (рис. 9) показали, что УЗО повышает предел прочности с 660 до 810 МПа, при этом относительное удлинение до разрушения практически не изменяется. Установлено, что в образцах после УЗО происходит рост критического напряжения мартенситного сдвига с 210 до 320 МПа.

Анализ зависимостей "напряжение-деформация" исходных и обработанных УЗО образцов показал, что они качественно подобны и включают три стадии. Первая стадия – упругая деформация мартенситной фазы В19'. На второй стадии (псевдотекучести) происходит переориентация кристаллов фазы В19'

преимущественно вдоль направления растягивающих напряжений. На этой стадии деформация образцов до и после УЗО достигает весьма больших значений (до 10 %). На третьей стадии развиваются процессы пластической деформации сформировавшейся системы деформационных доменов фазы В19', завершающиеся разрушением образцов.

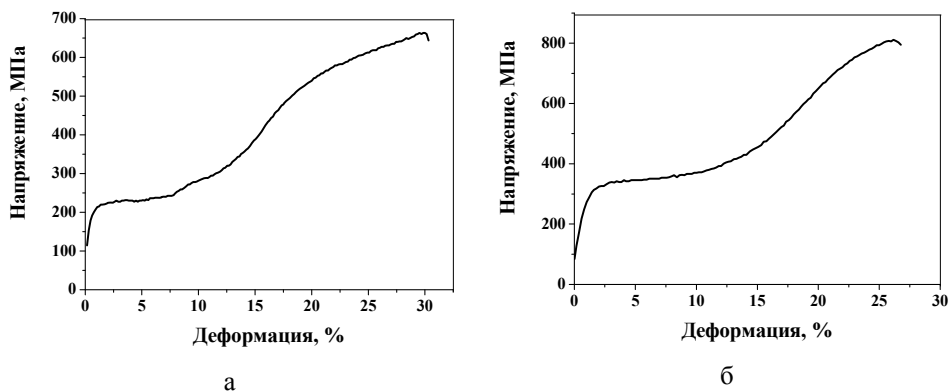


Рис. 9. Кривые "напряжение-деформация" при растяжении образцов сплава TiNi до (а) и после (б) УЗО ($P_{\text{ст}} = 100$ Н)

Новая технология на основе ультразвуковой упрочняющей поверхностной обработки отработана на широком круге реальных промышленных деталей и изделий с различной геометрической формой поверхности – цилиндрической, сферической, винтовой и других более сложных (авиационные турбинные лопатки, штампы, распределительные и коленчатые валы автомобиля, валы привода колес и др.). При этом общие размеры и вес обрабатываемых деталей в ряде случаев достигал весьма значительных величин. Так, например, был успешно обработан вал прокатного стана диаметром 800 мм, с диаметром рабочей части 1500 мм и весом 5200 кг из закаленной стали 4X5MФ1С.

Поверхность детали после УЗО имеет однородную наноструктуру в совокупности с высокими остаточными напряжениями, что существенно снижает ее адсорбционные свойства и повышает энергию активации процесса проникновения водорода, а в конечном итоге – уменьшает параметры водородопроницаемости. Эффект снижения водородопроницаемости может быть полезен в разных отраслях промышленности, в том числе в атомной энергетике, для которой является актуальной проблема защиты элементов паровых энергетических установок от воздействия "коррозионного" водорода, выделяющегося при коррозии металла в воде и водяном паре. Так же, в связи с разработкой водородного автомобильного двигателя, возможна обработка с помощью технологии УЗО поверхности контейнеров для гидридообразующих материалов – хранителей водорода.

Научно-исследовательская работа проведена в рамках реализации ФКЦ "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Лесюк Е. А., Алехин В. П. Формирование нано- и субмикроструктур в инструментальных и конструкционных материалах и обеспечение их термической стабильности: монография. – М.: МГИУ, 2009. С. 247.
2. Лесюк Е. А. Технология получения нанокристаллической структуры в поверхностных слоях массивных деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Технология металлов. № 7. 2008. С. 29–36.
3. Лесюк Е. А., Алехин В. П., Ким Чанг Сик. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности // Вестник машиностроения. № 9. 2008. С. 52–55.