

ВЛИЯНИЕ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЧАСТОТОЙ

В.П. Алехин, О.В. Алехин, Е.В. Крылова

Московский государственный индустриальный университет, Москва, Россия

E-mail: alehin_valentin@mail.ru; тел. (495)620-37-63

Рассмотрены закономерности поверхностной упрочняющей ультразвуковой обработки (УЗО) массивных деталей из закаленных конструкционных и инструментальных сталей для получения высокой твердости и прочности путем создания нанокристаллических структур с размером зерна 5...10 нм и влияние основных технологических параметров УЗО на величину микрогеометрии и микротвердости обрабатываемого материала.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема получения высокопрочных материалов с использованием различных видов термического и термомеханического воздействий на протяжении многих лет традиционно является актуальной для материаловедов.

В данной работе решение проблемы получения высокопрочного состояния в результате многократных интенсивных деформаций и диспергирования структуры вплоть до нанокристаллических размеров выполнялось с использованием метода поверхностной упрочняющей обработки с наложением ультразвуковых колебаний на рабочий инструмент [1–5].

Ранее в работах по упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом [6–8] была показана эффективность этого способа для понижения микрогеометрии R_z и повышения твердости различных деталей машиностроения. Однако в этих работах не было детальных исследований по закономерностям изменения физико-механических и микрогеометрических свойств поверхности в зависимости от весьма большого количества технологических параметров (амплитуды колебаний, величин статической нагрузки, окружной скорости, подачи, диаметра рабочего наконечника), а также закономерностей изменения твердости и шероховатости в зависимости от содержания углерода в различных конструкционных и инструментальных материалах. Весьма принципиальным моментом является также определение величин остаточных напряжений сжатия по сечению обработанного материала и его усталостной прочности до УЗО и после УЗО. Структура обработанного материала исследовалась, как правило, только металлографическим методом.

Поэтому основная цель настоящей работы заключалась в исследовании закономерностей изменения твердости и микрогеометрии широкого класса конструкционных и инструментальных сталей в зависимости от технологических параметров УЗО. Другим принципиально важным моментом являлось доказательство возможности получения нанокристаллической структуры методом электронной микроскопии высокого

разрешения, а также определение усталостной прочности и эпюры остаточных напряжений до и после УЗО.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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

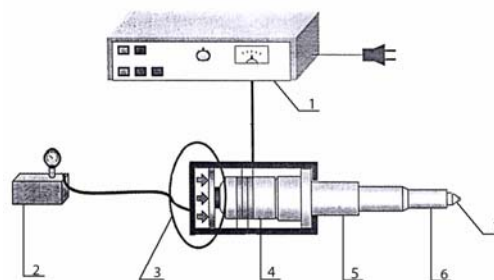


Рис. 1. Схема установки для ультразвуковой упрочняющей обработки с пьезокерамическим преобразователем: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – воздушный компрессор для обеспечения статической нагрузки на инструмент; 3 – механизм регулировки усилия, обеспечиваемого пневмосистемой; 4 – пьезокерамический источник; 5 – бустер; 6 – волновод; 7 – сферический наконечник

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние амплитуды на величину микрогеометрии поверхности стали 45 изображено на рис. 2. Для инструмента с коэффициентом усиления амплитуды колебаний $N = 6,67$ в

начальный момент при росте амплитуды A R_z падает. При дальнейшем росте A шероховатость R_z возрастает, поскольку с увеличением A растет энергия удара, которая при некотором критическом значении вызывает перенапряжение (контактная усталость) в материале. В результате в тонком поверхностном слое возникают микротрещины и происходит «шелушение» материала. Число ударов N на единицу площади при УЗО определяется частотой ультразвуковых колебаний f , величиной подачи S мм/об., окружной скоростью V м/мин и числом проходов i :

$$N = 60 (f / SV) i.$$

При УЗО $N = 4000 \dots 7000$ ударов/мм². Величина подачи S должна быть согласована с энергией удара инструмента, чтобы диаметр отпечатка был несколько больше подачи для полного перекрытия единичных ударов по площади контакта, так как в противном случае на поверхности останутся необработанные участки.

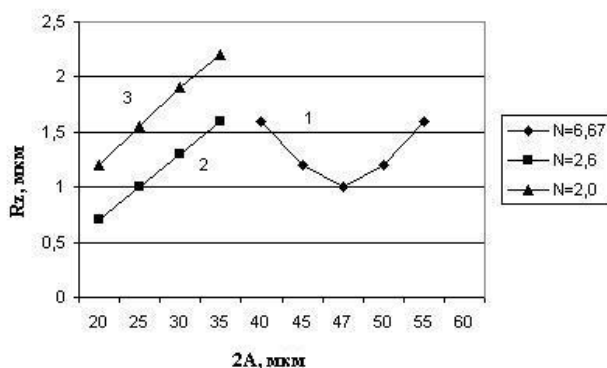


Рис. 2. Влияние амплитуды на величину микрогеометрии поверхности. Статическое усилие $P_{ст} = 50$ Н; $V = 40$ м/мин; $S = 0,07$ м/об.; диаметр шара $D_{ш} = 10$ мм. Сталь 45. $N = A/A_1$ – коэффициент усиления

Влияние статического усилия на микрогеометрию поверхности приведено на рис. 3.

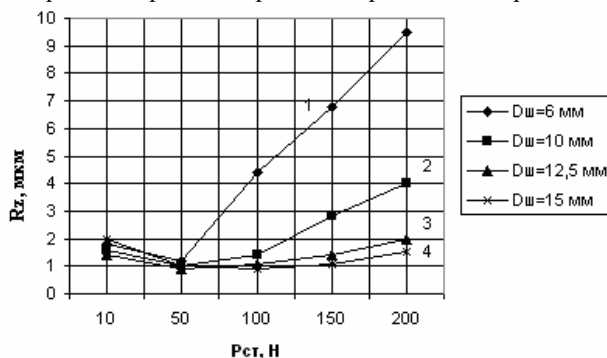


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности упрочненных образцов из стали 45 диаметром 20 мм от статического усилия при различных диаметрах шара.

$$2A = 20 \text{ мкм}; V = 40 \text{ м/мин}; S = 0,07 \text{ мм/об.}$$

Сложность определения оптимальной величины статического усилия обусловлена тем, что она зависит от большого числа взаимосвязанных факторов. Величина статического усилия зависит от

механических свойств обрабатываемого материала, исходной и требуемой шероховатости поверхности, размеров упрочняемой детали и диаметра шара рабочего инструмента, от параметров режима упрочнения-подачи и скорости вращения детали, амплитуды колебания и др. Статическое усилие должно быть тем выше, чем менее пластичен материал детали, чем выше исходная шероховатость, чем больше диаметр упрочняемой детали и сферической формы рабочего инструмента (это ведет к увеличению пятна контакта и снижению напряжений в деформируемой зоне), чем больше подача и скорость вращения детали и чем меньше амплитуда колебания инструмента.

Причина немонотонного поведения функции $R_z = f(P_{ст})$ и более резкого возрастания R_z на правых ветвях кривых с уменьшением диаметра шара $D_{ш}$ (см. рис. 3) связана с тем, что при этом уменьшается площадь контакта (при $P_{ст} = \text{const}$) и соответственно резко возрастают контактные напряжения (σ_k), что приводит к более быстрому перенаклепу. При малых $P_{ст}$ происходит недостаточная передача энергии, необходимой для пластического деформирования гребешков исходной микрогеометрии. С увеличением $P_{ст}$ величина передаваемой энергии увеличивается и повышается степень деформации, происходит сглаживание микронеровностей. При дальнейшем увеличении $P_{ст}$ в поверхностном слое возникают напряжения большие, чем предел прочности, что приводит к перенаклепу, «шелушению» и снижению чистоты поверхности.

Для обеспечения необходимой шероховатости поверхности выбор величины статического усилия должен быть согласован с режимами упрочнения и в первую очередь с материалом упрочняемой детали и ее диаметром. Чем ниже в материале содержание углерода и соответственно ниже твердость, тем сильнее влияние перенаклепа; с повышением содержания углерода и соответственно и твердости $R_z = \text{min}$ смещается в сторону больших величин $P_{ст}$ от 40 до 100 Н.

Влияние материала упрочняемой детали на величину микрогеометрии поверхности представлено на рис. 4.

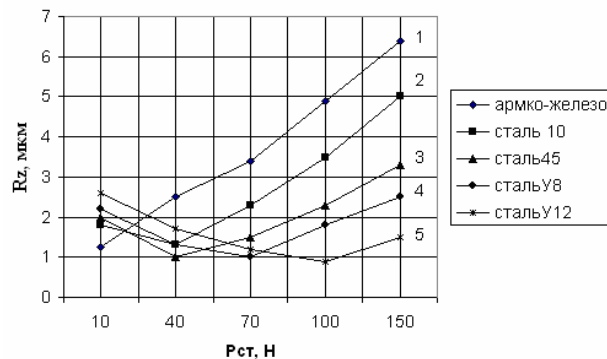


Рис. 4. Зависимость R_z от $P_{ст}$. $2A = 20$ мкм; $V = 40$ м/мин; $S = 0,07$ мм/об.; $D_{ш} = 10$ мм

При упрочнении мягких материалов типа α -Fe и Ст10 понижение чистоты поверхности в значительной степени происходит из-за образования

явно выраженного «навала» выдавленного материала.

Влияние амплитуды колебаний и величины статической нагрузки при УЗО на величину микротвердости обрабатываемых материалов представлено на рис. 5-7.

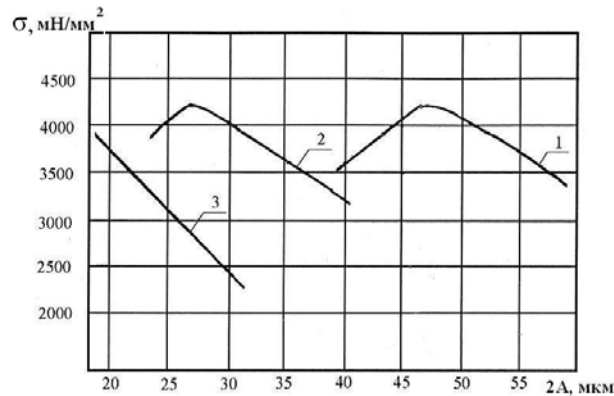


Рис. 5. Зависимость микротвердости стали 45 от амплитуды УЗО. $P_{ст} = 50$ м; $V = 40$ м/мин; $S = 0,07$ мм/об.; $D_{ш} = 10$ мм. Кривая 1: $N = 6,67$; кривая 2: $N = 4,00$; кривая 3: $N = 2,00$

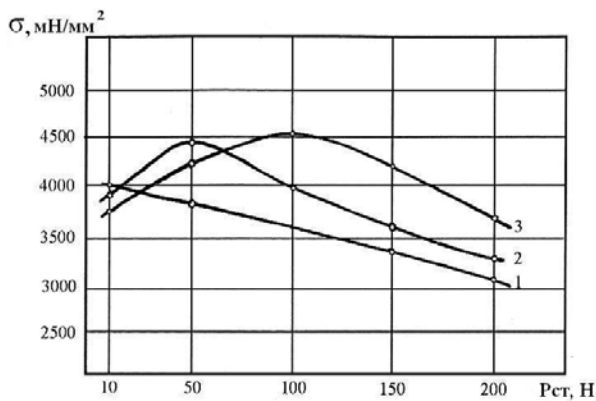


Рис. 6. зависимость микротвердости стали 45 от статической нагрузки $P_{ст}$ при УЗО, при различных диаметрах рабочего инструмента (шара) $D_{ш}$. $2A = 20$ мкм; $V = 40$ м/мин; $S = 0,07$ мм/об. Кривая 1: $D_{ш} = 6$ мм; кривая 2: $D_{ш} = 8$ мм; кривая 3: $D_{ш} = 12,5$ мм;

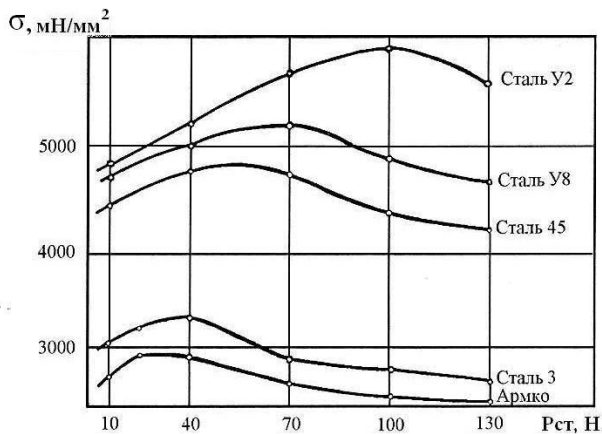


Рис. 7. Зависимость микротвердости от $P_{ст}$ для различных материалов при $D_{ш} = 10$ мм

Наличие экстремума (максимума) на всех представленных зависимостях, так же как и в случае R_z , обусловлено тем обстоятельством, что при росте амплитуды A и нагрузки $P_{ст}$ также появляется переупрочнение (перенаклеп и контактная усталость, рис. 7, 8). Причем, она появляется тем раньше, т. е. при меньших значениях соответствующих параметров (см. рис. 7), чем меньше содержание углерода в обрабатываемом материале и соответственно больше его способность к деформационному упрочнению.

Результаты исследования структуры и физико-механических свойств инструментальной штамповой стали 4X5MФ1С после ультразвуковой обработки представлены на рис. 9-15. Методом просвечивающей микроскопии высокого разрешения показана возможность получения нанокристаллической структуры с размером зерен 5...10 нм (см. рис. 9) на любых массивных деталях из закаленной стали 4X5MФ1С на глубине 15...20 мкм от поверхности и микроструктурной структуры на глубине 250...300 мкм от поверхности обработанного материала (см. рис. 10).

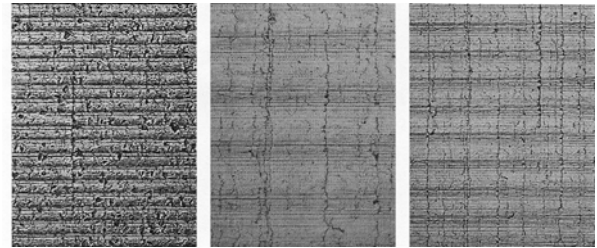


Рис. 8. Появление трещин в приповерхностных слоях инструментальной штамповой стали 4X5MФ1С вследствие переупрочнения (перенаклепа и контактной усталости)

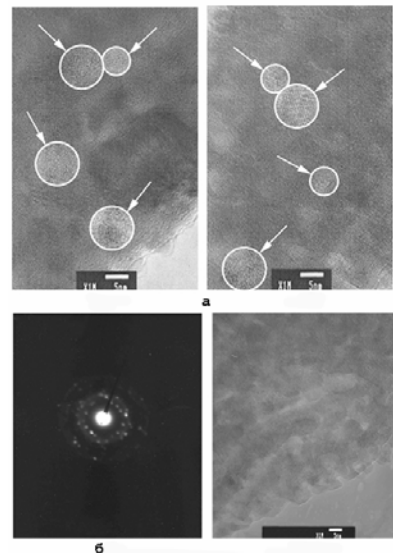


Рис. 9. Нанокристаллическая структура с разрешением атомных рядов (см. стрелки) на стали 4X5MФ1С после ультразвукового упрочнения, выявленная методом электронной микроскопии высокого разрешения ($\times 10^6$)

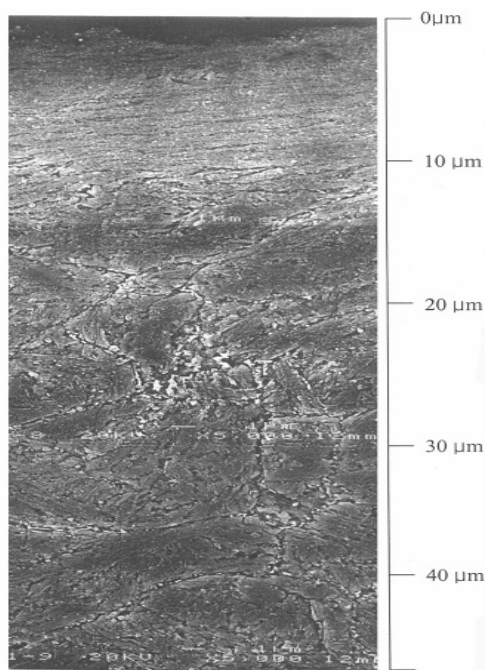


Рис. 10. Изменение структуры стали 4X5MФ1С УЗО от поверхности (верх рисунка) в глубину материала

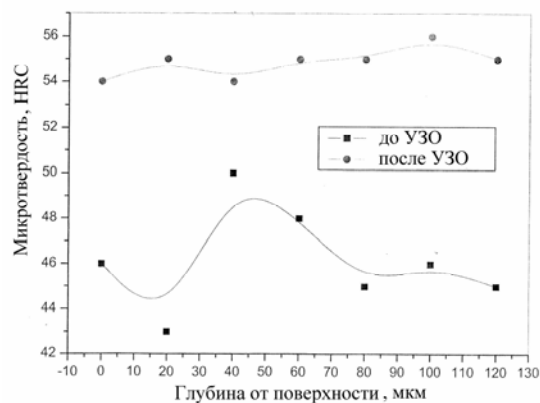
При этом наблюдается возрастание твердости с исходного уровня HRC 48...50 до 62...64, а в ряде случаев до 69...70 HRC. Подобная нанокристаллическая структура с размером зерен 5...7 нм и резким повышением твердости получена на массивной детали (при обработке прокатного стана диаметром 800 мм, длиной 1500 мм и весом 5200 кг) (см. рис. 11).

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. Они дают возможность получения очень тонкой нанокристаллической структуры на деталях любых размеров и любой геометрии на глубинах 15–20 мкм при использовании компьютеризированной ультразвуковой технологии (см. рис. 12).

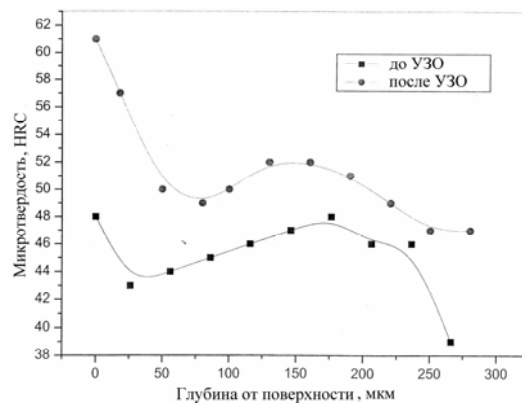
Разработанный метод ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки металлических материалов позволяет получить 10–12 класс чистоты поверхности с одновременным ее упрочнением по сравнению с исходным состоянием вследствие получения нанокристаллических структур на любых массивных деталях (валы прокатных станов, штампы, плунжера и др. (см. рис. 10) с размером зерна 5...10 нм на глубинах 15...20 мкм и субмикрокристаллических структур на глубинах до 250...300 мкм от поверхности, что существенно повышает твердость, прочность, износостойкость и ресурс работы различных деталей и узлов.

Изменение структуры от поверхности и в глубину материала после ультразвуковой обработки представлено на рис. 10, а изменение

микротвердости – на рис. 11, а, б. Например, для стали 4X5MФ1С, имеющей после закалки твердость 46...48 HRC УЗО повышает уровень твердости HRC до 62...64. Для ряда других инструментальных материалов, имеющих исходное HRC 54...55, УЗО поднимает твердость до 69...71 HRC.



а



б

Рис. 11. Изменение микротвердости от поверхности в глубину детали h, мкм: по Роквеллу плунжера из стали 4X5MФ1С (а); HRC вала прокатного стана из стали 4X5MФ1С (б)

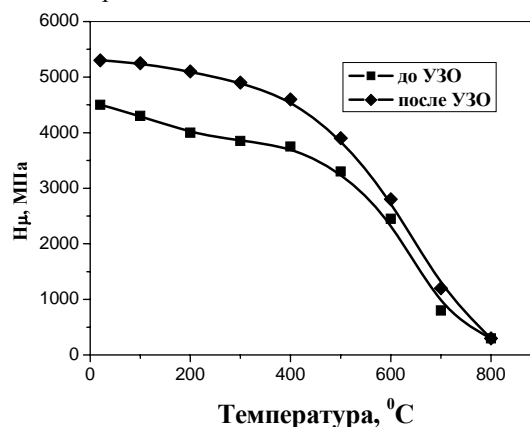


Рис. 12. Изменение микротвердости стали 4X5MФ1С от температуры нагрева до УЗО и после УЗО с амплитудой 20 мкм

На рис. 12 представлено изменение микротвердости стали 4X5MФ1С от температуры нагрева до и после УЗО с амплитудой 10 мкм. При этом величина шероховатости R_a снижается до 0,05...0,08 мкм, понижая коэффициент трения более чем в 2 раза (см. рис. 13) и увеличивая износостойкость.

стойкость деталей. При этом в поверхностных слоях на глубинах до 150...200 мкм возникают остаточные напряжения сжатия (см. рис. 14), резко повышающие предел хрупкой и усталостной прочностей (см. рис. 15). Процессы рекристаллизации при такой обработке практически заторможены, поскольку обработка ведется с охлаждением смазочно-охлаждающей жидкостью.

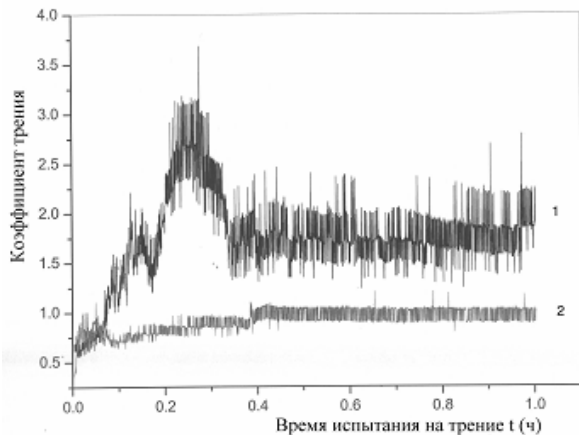


Рис. 13. Изменение коэффициента трения от времени испытания t (ч): 1 – до УЗО; 2 – после УЗО

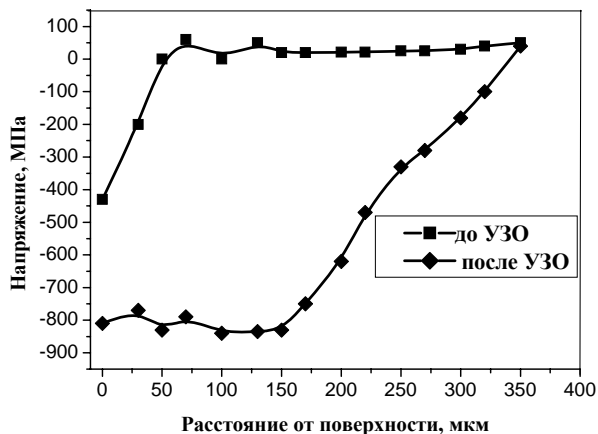


Рис. 14. Распределение остаточных напряжений от свободной поверхности в глубину обработанного УЗО материала на стали 4X5MФ1С

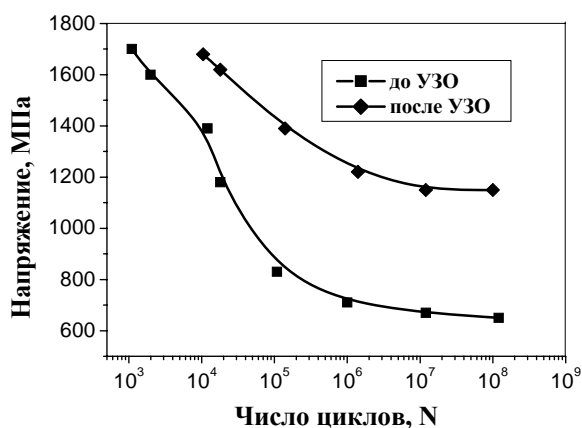


Рис. 15. Кривые усталостной прочности стали 4X5MФ1С до УЗО и после УЗО

ВЫВОДЫ

1. Исследованы закономерности изменения твердости и микрогеометрии широкого класса конструкционных и инструментальных сталей в зависимости от технологических параметров УЗО и процентного содержания углерода в них.

2. Показана экстремальная зависимость изменения этих свойств от технологических параметров, что обусловлено явлением переупрочнения, т. е. перенаклепом и контактной усталостью, что приводит к появлению сетки микротрещин в поверхностных слоях.

3. Методом электронной микроскопии высокого разрешения показана возможность получения нанокристаллической структуры после УЗО.

4. Показано, что величина остаточных напряжений сжатия после УЗО достигает величин порядка 850 МПа, что приводит к двукратному повышению усталостной прочности материала.

5. Предлагаемая технология поверхностной упрочняющей УЗО 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 отработана для широкого круга реальных промышленных деталей и изделий с различной геометрической формой поверхности – цилиндрической, сферической, тороидальной, винтовой, и др. При этом достигается высокая степень автоматизации процесса за счет применения компьютеризированной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта П545 в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.П. Алехин, О.В. Алехин. *Физические закономерности деформации поверхностных слоев материалов*. М.: МГИУ, 2011, 455 с.

2. В.П. Алехин. Физические закономерности микропластической деформации поверхностных слоев материалов и получения нанокристаллического состояния // *Машиностроительные технологии 04: Сб. пленарных докладов IV Международного конгресса (Варна, Болгария, сентябрь 2004 г.)*, с. 12–19.

3. В.П. Алехин, Ю.М. Боровин, С.М. Жаркий, Й.С. Пьен, Ш.Н. Азума, Ч.С. Ким, И.С. Чо. Повышение эксплуатационных свойств деталей транспортного машиностроения способом ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки // *Сб. докладов Международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем – 2003», Ростов-на-Дону, сентябрь 2003*, т. 1, с. 35–38.

4. В.П. Алехин, Й.С. Пьен, Ч.С. Ким, Й.В. Сонг. Получение нанокристаллических материалов с использованием высоких гидростатических давлений со сдвигом и ультразвуковой упрочняющей обработки // *Сб. научных трудов Международной конференции*

«Новые перспективные материалы и технология их получения – 2004», Волгоград, 2004, т. I, с. 22–24.

5. В.П. Алехин, О.В. Алехин. Резервы повышения физико-механических свойств материалов и изделий после поверхностной упрочняющей обработки // *Сб. докладов Международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем– 2003», Ростов-на-Дону, сентябрь 2003, т. 1, с. 39–40.*

6. Г.Д. Ан. *Исследование процесса ультразвукового упрочнения высокопрочных авиационных*

материалов: Автор. дис. ... канд. наук. Куйбышев: КУАИ, 1969, 21 с.

7. И.И. Муханов, Ю.М. Голубев. Поверхностный слой стальных деталей машин после ультразвуковой чистовой и упрочняющей обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов. 1969, №9, с. 29–32.*

8. В.Б. Асанов. *Качество поверхностного слоя деталей машин и его особенности после упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1972, 32 с.*

Статья поступила в редакцию 14.06.2011 г.

ВПЛИВ НА ДЕФЕКТНУ СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ І ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ УДАРНОЇ ДІЇ З УЛЬТРАЗВУКОВОЮ ЧАСТОТОЮ

В.П. Альохін, О.В. Альохін, Є.В. Крилова

Розглянуті закономірності поверхневої зміцнюючої ультразвукової обробки (УЗО) масивних деталей із загартованих конструкційних і інструментальних сталей для здобуття високої твердості і міцності за рахунок створення нанокристалічних структур з розміром зерна 5...10 нм і вплив основних технологічних параметрів УЗО на величину мікрогеометрії і мікротвердості оброблюваного матеріалу.

INFLUENCE OF IMPACT WITH ULTRASONIC FREQUENCY ON DEFECTED STRUCTURE AND PROPERTIES OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS

V.P. Alyekhin, O.V. Alyekhin, E.V. Krilov

Mechanisms of surface hardening by ultrasonic treatment (UST) of massive details of hardened structural and tool steels for production of high hardness and strength at the expense of production of nanocrystalline structures with grain dimension 5-10 nm and influence of main technological parameters of UST on value of microgeometry and microhardness of treated material are examined.