

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

В.П. Алехин, О.В. Алехин



**АЛЕХИН  
Валентин  
Павлович**

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член РАЕН и МАН ВШ, заведующий кафедрой «Техническая физика» МГИУ. Область научных интересов – физикохимия поверхности, физическое материаловедение, физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Автор более 650 научных работ, в том числе 6 монографий, одного учебника, 30 авторских свидетельств и патентов.

## Введение

Проблема получения высокопрочных материалов с использованием различных видов термического и термомеханического воздействия на протяжении многих лет традиционно является актуальной для материаловедов [1–3]. В последние десятилетия она обычно решается за счет реализации двух основных направлений:

1) использования быстрозакаленного метастабильного состояния материала (микросталлические и аморфные сплавы);

2) компактирования микросталлических и нанодисперсных порошковых материалов.

Однако на пути реализации указанных направлений существуют значительные трудности. В первом случае в получаемых быстрой закалкой аморфных порошках или тонких лентах при компактировании резко падает уровень физико-механических свойств за счет протекания процессов структурной релаксации и кристаллизации, во втором – низкая температура рекристаллизации нанодисперсных порошко-



**АЛЕХИН  
Олег  
Валентинович**

Старший научный сотрудник НИИ технологии материалов. Направление научной деятельности – физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Автор 26 научных работ, в том числе 2 патентов.

вых систем является основным препятствием на пути сохранения исходной дисперсности структуры и получения соответствующего уровня физико-механических свойств. Кроме этого оба технологических подхода требуют дорогостоящего специализированного оборудования как на стадии получения исходных материалов, так и при компактировании. Так, высокая химическая активность нанодисперсных порошков требует проведения всех технологических операций в вакууме или контролируемой среде. Поэтому в силу указанных обстоятельств задача получения высокопрочных массивных конструкционных материалов с использованием этих подходов до настоящего времени практически не решена и не вышла за рамки поисковых лабораторных исследований. В связи с этим представляет интерес нахождение альтернативного порошковой металлургии технологического решения для получения материала с нанодисперсной структурой без стадии получения порошков и их компактирования. Последнее возможно осуществить за счет сильного деформационного воздействия (многократной деформации типа РКУ-прессования, гидроэкструзии, в наковальнях Бриджмена или в валах прокатного стана).

В данной работе решение проблемы получения высокопрочного состояния материала за счет многократных интенсивных деформаций и диспергирования структуры вплоть до нанокристаллических размеров рассматривалось с использованием метода поверхностной упрочняющей обработки с наложением ультразвуковых колебаний на рабочий инструмент [3–8].

Широко применяемые упрочняюще-чистовые способы (обкатывание шаром, роликом, дорнование и др.) по характеру воздействия на поверхностный слой детали являются статическими и из-за относительно малых давлений и скоростей деформации не позволяют достаточно полно использовать способность металлов к упрочнению. Более исчерпывающее использование этой способности можно получить, если заменить статический способ деформирования импульсным. Наиболее перспективной

является импульсная упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом.

### Ультразвуковая обработка материалов

Ультразвуковая обработка (УЗО) материалов основана на использовании энергии механических колебаний инструмента-индентора, совершаемых с ультразвуковой частотой равной 20 кГц и амплитудой колебаний 5–50 мкм. Энергия в зону обработки поступает посредством статического усилия прижима инструмента к поверхности обрабатываемой детали. Технологическое оборудование для ультразвуковой обработки независимо от физико-механических свойств обрабатываемых металлов включает: источник питания, аппаратуру управления процессом обработки, механическую колебательную систему и привода давления. Схема установки для УЗО представлена на рис. 1.

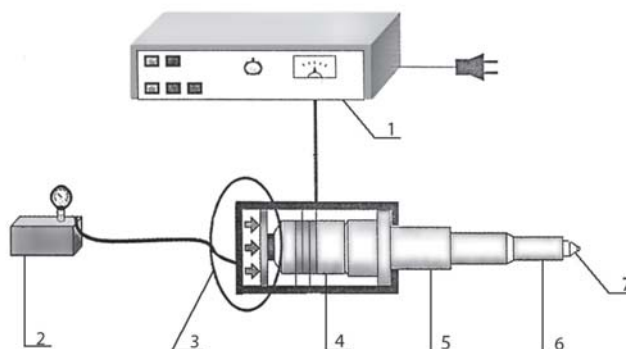


Рис. 1. Схема установки для ультразвуковой упрочняющей обработки с пьезокерамическим преобразователем:

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

Важнейшим узлом как основы оборудования и технологии ультразвуковой финишной упрочняющей обработки металлов, является колебательная система. Она служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в зону обработ-

ки, согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением системы и геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами излучателя, концентрирования энергии и получения необходимой колебательной скорости излучателя.

Для проведения процесса УЗО требуется ультразвуковой генератор, пьезострикционный или магнитострикционный преобразователь, станок и приспособление, фиксирующее преобразователь на суппорте станка. С помощью пьезострикционного преобразователя электрическая энергия ультразвуковой частоты преобразуется в механическую энергию той же частоты.

Смещение рабочего торца инструмента определяется гармоническим законом:

$$A = A_0 \sin \omega t,$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – круговая частота ультразвуковых колебаний;  $t$  – текущее время.

Дифференцируя, получаем законы изменения скорости и ускорения колебаний инструмента:

$$V_k = \omega A_0 \cos \omega t, \quad a = -\omega^2 A_0 \sin \omega t.$$

Полная нагрузка на инструмент определяется как

$$F = P_{ст} + P \sin \omega t,$$

где  $P_{ст}$  – нормальная статическая нагрузка на инструмент;  $P$  – амплитуда динамической нагрузки.

### Выбор величины нагрузки на инструмент

Аналитическое решение задачи о соударении твердых тел, сопровождаемом пластическим смятием, сопряжено с большими трудностями. В настоящее время существуют ограниченные полуэмпирические решения [7, 8], которые в ряде случаев не позволяют решать конкретные задачи прикладного характера. Тем не менее, опыт показывает, что путем некоторых искусственных приемов можно получить инженерное решение конкретной задачи.

В рассматриваемом плане представляет интерес работа [7], посвященная анализу ударного способа упрочнения. С увеличением чис-

ла ударов при одинаковой энергии каждого удара диаметр отпечатка шарика и глубина пластической зоны растут до некоторых значений, зависящих от механических свойств материала. Рассмотрение результатов этих опытов [7] показывает, что увеличение диаметра отпечатка прекращается после 10–16 ударов, а с увеличением твердости испытуемого материала стабилизация диаметра наступает быстрее. Был исследован вопрос о глубине распространения пластических деформаций при статическом и ударном нагружении и установлено, что глубина наклепанной зоны, полученной при многократном динамическом вдавливании в пластину сферического пуансона, практически равна глубине наклепанного слоя, полученного при однократном статическом вдавливании пуансона при условии равенства диаметров пластических отпечатков в том и другом случаях [7].

Закономерность, установленная опытным путем, позволяет решить ряд динамических задач. В частности, если нам известны размеры отпечатка после динамического воздействия, то мы можем аналитически получить то условное статическое усилие, которое приводит к аналогичному размеру отпечатка. А так как при этом одновременно наблюдается и равенство зон пластического деформирования, то с достаточным приближением по найденной статической нагрузке можно вычислить работу сил пластического деформирования, внесенную при динамическом нагружении. В дальнейшем указанные закономерности были использованы для расчета условной статической нагрузки при ультразвуковом упрочнении.

Аналитическое решение для определения силы вдавливания сферического пуансона (шарика) выполнил А.Д. Томленов [9], используя метод характеристик. При отсутствии трения по поверхности вдавливания пуансона нормальное контактное напряжение выражается зависимостью:

$$\sigma_H = \sigma_s \left( 1 + \frac{\pi}{2} - \gamma \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала;

$\gamma = \arcsin\left(\frac{\rho}{R}\right)$  – угол, физический смысл которого ясен из рис. 2.

Зависимость (1) получена при условии, что касательные напряжения на поверхности контакта шарика с изделием отсутствуют. Однако, как показал С.И. Губкин [10], такое допущение не вносит заметных погрешностей. Так, например, при внедрении плоского пуансона в условиях контактного трения (сила трения на контакте равна максимальному сдвигающему напряжению) максимальное значение нормального контактного напряжения (в момент внедрения) равно:

$$\sigma_{н, \max} = 2,885\sigma_s, \quad (2)$$

а при условии отсутствия трения

$$\sigma_{н, \max} = 2,57\sigma_s. \quad (3)$$

Из сопоставления выражений (2) и (3) следует, что учет сил трения приводит к увеличению максимального нормального напряжения на 11%.

При диаметре отпечатка ( $d$ ), значительно меньшего диаметра внедряемого шара ( $D_{ш} = 2R$ ), что характерно для процесса ультра-

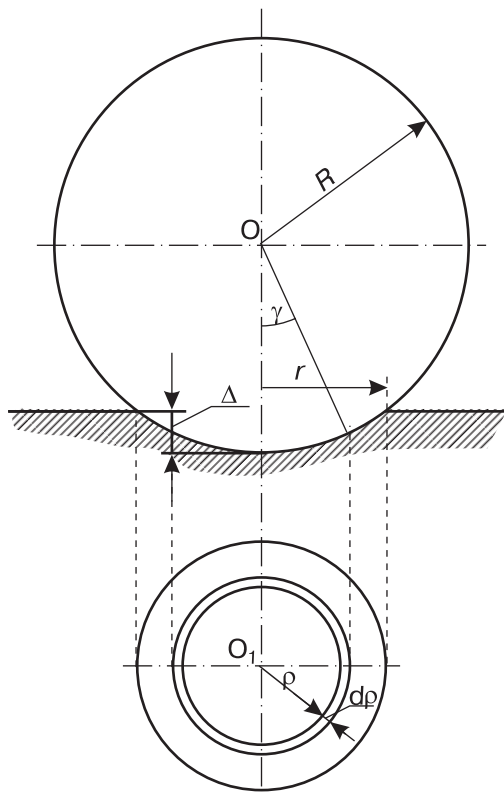


Рис. 2. Схема внедрение сферы в материал (согласно работе [9])

звукового упрочнения, нормальное напряжение на отпечатке практически совпадает с таковым для плоского пуансона [10]. Принимая это во внимание, внесем поправку в зависимость (1) в виде коэффициента:

$$\psi = 2,885/2,57 \approx 1,1,$$

с учетом которого зависимость для определения нормального напряжения на площадке контакта при наличии сил трения будет иметь вид:

$$\sigma_n = \psi \cdot \sigma_s \left( 1 + \frac{\pi}{2} - \gamma \right). \quad (4)$$

Следует отметить, что зависимости для нормальных напряжений, найденные методом характеристик, скорее отображают среднее нормальное напряжение, чем распределение напряжений по поверхности контакта [10]. Тем не менее их использование позволяет в целом ряде случаев получить удовлетворительные инженерные решения.

Зависимость для определения силы статического внедрения шара может быть записана в виде:

$$P_{ст} = \int_F \sigma_n \cdot dF, \quad \text{где } dF = 2\pi r dr.$$

Подставляя выражение для нормального напряжения  $\sigma_n$ , получим:

$$P_{ст} = \int_0^r \psi \cdot \sigma_s \cdot \left( 1 + \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\rho}{R} \right) \cdot 2\pi r \cdot dr,$$

где  $r$  – радиус отпечатка.

После преобразования и упрощения получим:

$$P_{ст} = \psi \cdot \pi \sigma_s \left[ \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right) r^2 + \left( \frac{R^2}{2} - r^2 \right) \arcsin \left( \frac{r}{R} \right) - \frac{r}{2} \sqrt{R^2 - r^2} \right]. \quad (5)$$

Глубину проникновения пластических деформаций от сферического индентора при ультразвуковой обработке можно определить по приближенной формуле [11]:

$$\Delta = \sqrt{P_{ст} / 1,96\sigma_s}. \quad (6)$$

Расчет динамического усилия  $F_{уд}$  (силы удара) на конце ультразвукового инструмента и времени удара  $t_{уд}$  для идеально пластического и абсолютно упругого удара, а также для упруго-пластического удара был выполнен в работе [12], в соответствии с результатами которой принимаем:

– при идеально пластическом ударе

$$t_{уд} = \frac{T \cdot P_{CT}}{P_{CT} + 4\sqrt{AR\sigma_s P_{CT}} \cos \omega t_1}, \quad (7)$$

$$F_{уд} = P_{CT} + 4\sqrt{AR\sigma_s P_{CT}} \cos \omega t_1; \quad (8)$$

при абсолютно упругом ударе

$$t_{уд} = \frac{4,53T[(\delta_1 + \delta_2) \cdot P_{CT} \cdot T]^{2/5}}{4,53[(\delta_1 + \delta_2) \cdot P_{CT} \cdot T]^{2/5} + T[4A^3 R \omega^3 (\cos \omega t_1)^3]^{1/5}}, \quad (9)$$

$$F_{уд} = P_{CT} \left\{ 1 + \frac{T}{4,53} \left[ \frac{4A^3 R \omega^3 (\cos \omega t_1)^3}{(\delta_1 + \delta_2)^2 \cdot P_{CT}^2 \cdot T^2} \right]^{1/5} \right\}; \quad (10)$$

при упруго-пластическом ударе

$$t_{уд} = \frac{4,53T[(\delta_1 + \delta_2) \cdot P_{CT} \cdot T]^{2/5}}{4,53[(\delta_1 + \delta_2) \cdot P_{CT} \cdot T]^{2/5} + T[4A^3 R \omega^3]^{1/5}}, \quad (11)$$

$$F_{уд} = P_{CT} \left\{ 1 + \frac{T}{4,53} \left[ \frac{4A^3 R \omega^3}{(\delta_1 + \delta_2)^2 \cdot P_{CT}^2 \cdot T^2} \right]^{1/5} \right\}; \quad (12)$$

$$\delta_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{\pi E_{1,2}},$$

где  $P_{CT}$  – статическая нагрузка;  $T$  – период колебаний,  $A$  – амплитуда ультразвуковых колебаний;  $\sigma_s$  – предел текучести;  $\mu_{1,2}$  и  $E_{1,2}$  – коэффициенты Пуассона и модули упругости инструмента и обрабатываемого материала, соответственно.

### Параметрический анализ

Для достижения высокого класса чистоты и оптимального упрочнения поверхности детали необходимо выбрать определенные режимы. Для обеспечения необходимой шероховатости поверхности ( $R_z \rightarrow \min$ ) требуется пластически деформировать более тонкий поверхностный слой глубиной  $h$  ( $h \rightarrow \min$ ), а для получения максимального упрочняющего эффекта пластическая деформация должна захватывать поверхностные слои на значительную глубину ( $h \rightarrow \max$ ). Эти взаимоисключающие требования ( $h \rightarrow \min$ ,  $h \rightarrow \max$ ) в случае одновременного получения минимальной шероховатости ( $R_z \rightarrow \min$ ) и максимальной твердости ( $H_v \rightarrow \max$ ) довольно сложно выполнить. Поэтому подбор оптимальных режимов в этом случае более сло-

жен, чем в случае, когда требуется только  $R_z = \min$  или только  $H_v = \max$ .

Влияние амплитуды колебаний инструмента на величину шероховатости  $R_z$  поверхности детали из стали 45 представлено на рис. 3. Для инструмента с коэффициентом усиления амплитуды колебаний  $N = A/A_1 = 6,67$  в начальный момент при росте амплитуды  $A$  шероховатость  $R_z$  уменьшается ( $A_1$  – амплитуда колебаний пьезострикционного сердечника). При дальнейшем увеличении  $A$  шероховатость  $R_z$  возрастает, поскольку с увеличением  $A$  растет энергия удара, которая при некотором критическом значении вызывает перенапряжение (контактную усталость) в материале. В результате, в тонком поверхностном слое возникают микротрещины и происходит «шелушение» материала. Число ударов  $N_0$  на единицу площади при УЗО определяется частотой ультразвуковых колебаний  $\omega$ , величиной подачи  $S$  мм/об, окружной скоростью  $V$  м/мин и числом проходов  $i$ :

$$N_0 = 60(f/SV)i.$$

При УЗО  $N_0 = 4000-7000$  ударов/мм<sup>2</sup>. Величина подачи  $S$  должна быть согласована с энергией удара инструмента так, чтобы диаметр отпечатка был несколько больше подачи, с целью полного перекрытия единичных ударов по площади контакта, так как в противном случае на поверхности останутся необработанные участки.

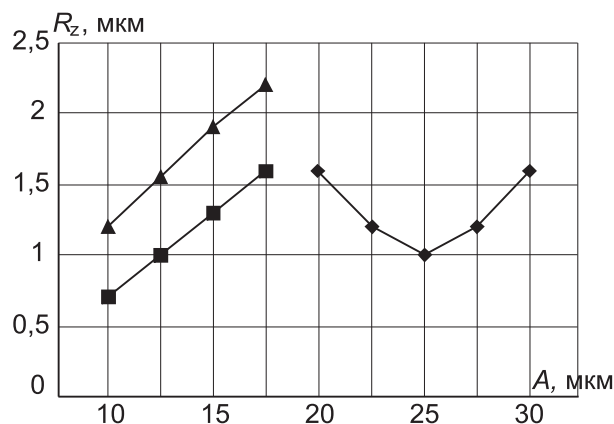


Рис. 3. Влияние амплитуды на величину микрогеометрии поверхности ( $P_{CT} = 50H$ ;  $V=40$  м/мин;  $S=0,07$  м/об;  $D_w=10$  мм; Сталь 45):  
 ◆ –  $N=6,67$ ; ■ –  $N=2,6$ ; ▲ –  $N=2$



Влияние статического усилия на микрогеометрию поверхности представлено на рис. 4. Сложность определения оптимальной величины статического усилия обусловлена тем, что она зависит от большого числа взаимосвязанных факторов: механических свойств обрабатываемого материала, исходной и требуемой шероховатости поверхности, размеров упрочняемой детали и диаметра шарика рабочего инструмента, параметров режима упрочнения – подачи и скорости вращения детали, амплитуды колебания и др. Статическое усилие должно быть тем больше, чем менее пластичен материал детали, чем выше исходная шероховатость, чем больше диаметры 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  $R_z(P_{ст})$  и более резкого возрастания  $R_z$  на правых ветвях кривых с уменьшением диаметра шара  $D_{ш}$  (рис. 4) связана с тем, что при этом уменьшается площадь контакта (при  $P_{ст} = const$ ) и соответственно резко возрастают контактные напряжения, что приводит к более быстрому перенаклепу. При малых значениях  $P_{ст}$  не про-

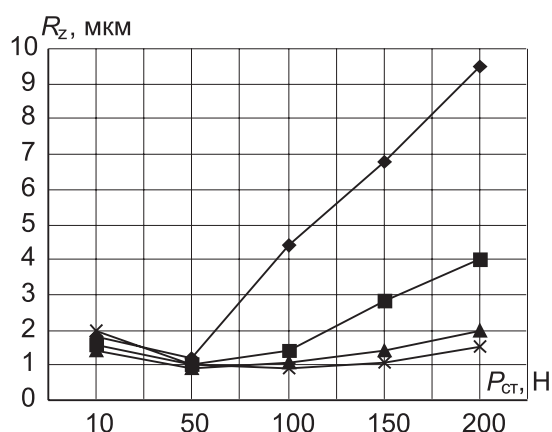


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности упрочненных образцов из стали 45 диаметром 20 мм от статического усилия ( $A=10 мк$ ;  $V=40 м/мин$ ;  $S=0,07 мм/об$ ):  
 —◆—  $D_{ш}=6 мм$ ; —■—  $D_{ш}=10 мм$ ;  
 —▲—  $D_{ш}=12,5 мм$ ; —×—  $D_{ш}=15 мм$

исходит передачи энергии, достаточной для пластического деформирования микронеровности исходной поверхности. С увеличением  $P_{ст}$  величина передаваемой энергии возрастает, повышается степень деформации и 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 меньше в материале содержание углерода и, соответственно, ниже твердость, тем сильнее влияние перенаклепа; с повышением содержания углерода и, соответственно, твердости положение  $R_z = min$  смещается в сторону больших значений  $P_{ст}$  от 40 до 100 Н.

Влияние материала упрочняемой детали на величину микрогеометрии поверхности представлено на рис. 5. При упрочнении мягких материалов типа  $\alpha$ -Fe и Ст.10 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 показано на рис. 6–8. Наличие экстремума (максимума) на всех представленных зависимостях, также как и в случае  $R_z(P_{ст})$ , обусловлено тем обстоятельством, что при росте амплитуды  $A$  и нагрузки  $P_{ст}$  также появляется переупрочнение (перенаклеп и контактная усталость, рис. 8, 9). Причем это происходит тем раньше, т.е. при меньших значениях соответствующих параметров (см. рис. 8), 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 4Х5МФ1С после ультразвуковой об-

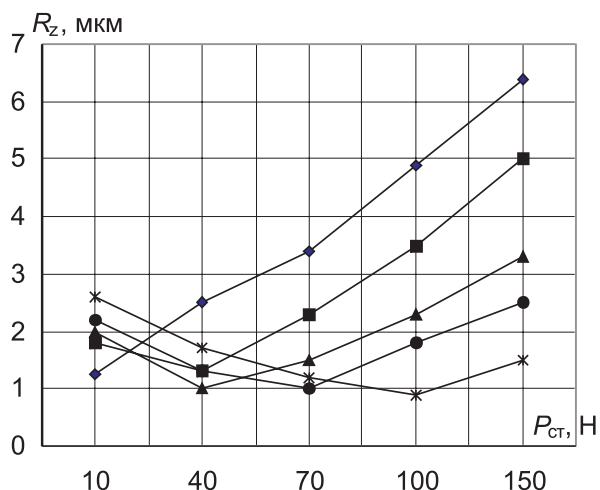


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности образцов из различных материалов от статического усилия ( $A=20$  мк,  $V=40$  м/мин,  $S=0,07$  мм/об,  $D_{ш}=10$  мм):  
 —◆— армо-железо; —■— сталь 10; —▲— сталь 45; —●— сталь У8; —\*— сталь У12

работки представлены на рис. 9–16. Методом просвечивающей микроскопии высокого разрешения показана возможность получения нанокристаллической структуры с размером зерен 5–10 нм (см. рис. 10) на любых массивных деталях из закаленной стали 4Х5МФ1С на глубине 15–20 мкм от поверхности и микрокристаллической структуры на глубине 250–300 мкм от поверхности обработанного материала (см. рис. 11).

При этом наблюдается возрастание твердости с исходного уровня 48–50 HRC до 62–64, а в ряде случаев до 69–70 HRC. Подобная же нанокристаллическая структура с размером зерен 5–7 нм и большими значениями твердости была получена на массивной детали (при обработке вала прокатного стана диаметром 800 мм, длиной 1500 мм и массой 5200 кг).

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 принципиально новыми. Они дают возможность получения очень тонкой нанокристаллической структуры на деталях любых раз-

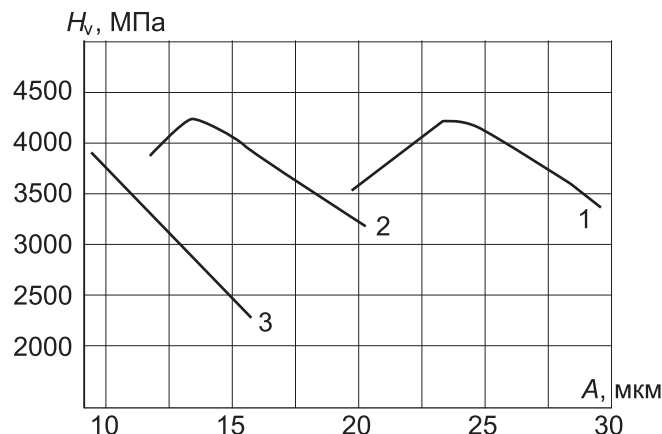


Рис. 6. Зависимость микротвердости стали 45 от амплитуды ( $P_{ст} = 50$  Н;  $V = 40$  м/мин;  $S = 0,07$  мм/об;  $D_{ш} = 10$  мм):  
 1 –  $N = 6,67$ ; 2 –  $N = 4,00$ ; 3 –  $N = 2,00$

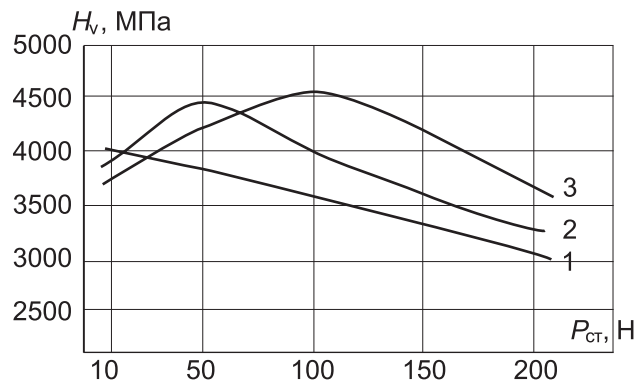


Рис. 7. Зависимость микротвердости стали 45 от статической нагрузки  $P_{ст}$  при УЗО ( $A = 10$  мкм;  $V = 40$  м/мин;  $S = 0,07$  мм/об):  
 1 –  $D_{ш} = 6$  мм; 2 –  $D_{ш} = 8$  мм; 3 –  $D_{ш} = 12,5$  мм

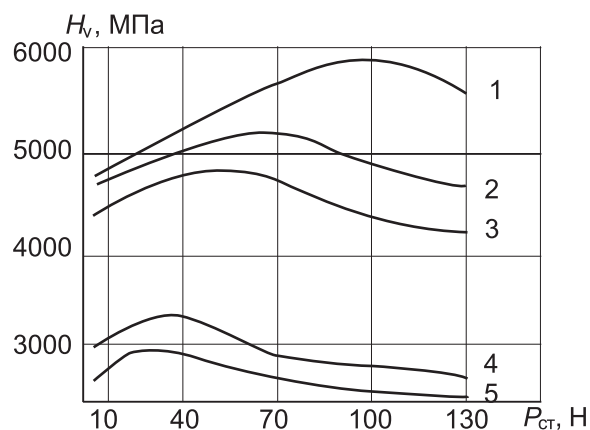


Рис. 8. Зависимость микротвердости от  $P_{ст}$  для различных материалов ( $D_{ш} = 10$  мм):  
 1 – сталь У2; 2 – сталь У8; 3 – сталь 45; 4 – сталь 3; 5 – армо-железо

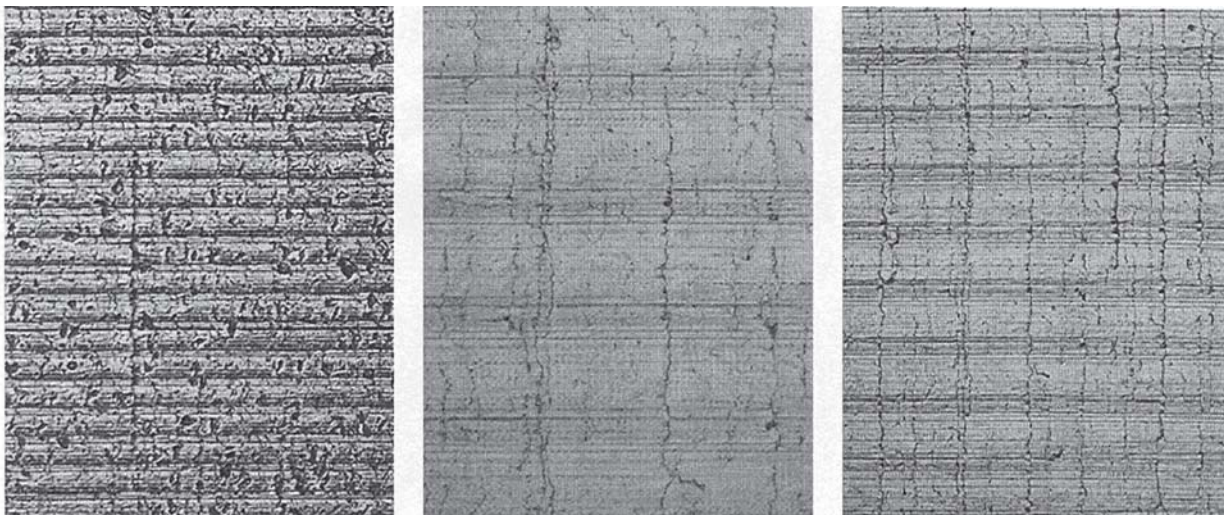


Рис. 9. Появление трещин в приповерхностных слоях образца из инструментальной штамповой стали 4X5MФ1С вследствие переупрочнения (перенаклепа и контактной усталости)

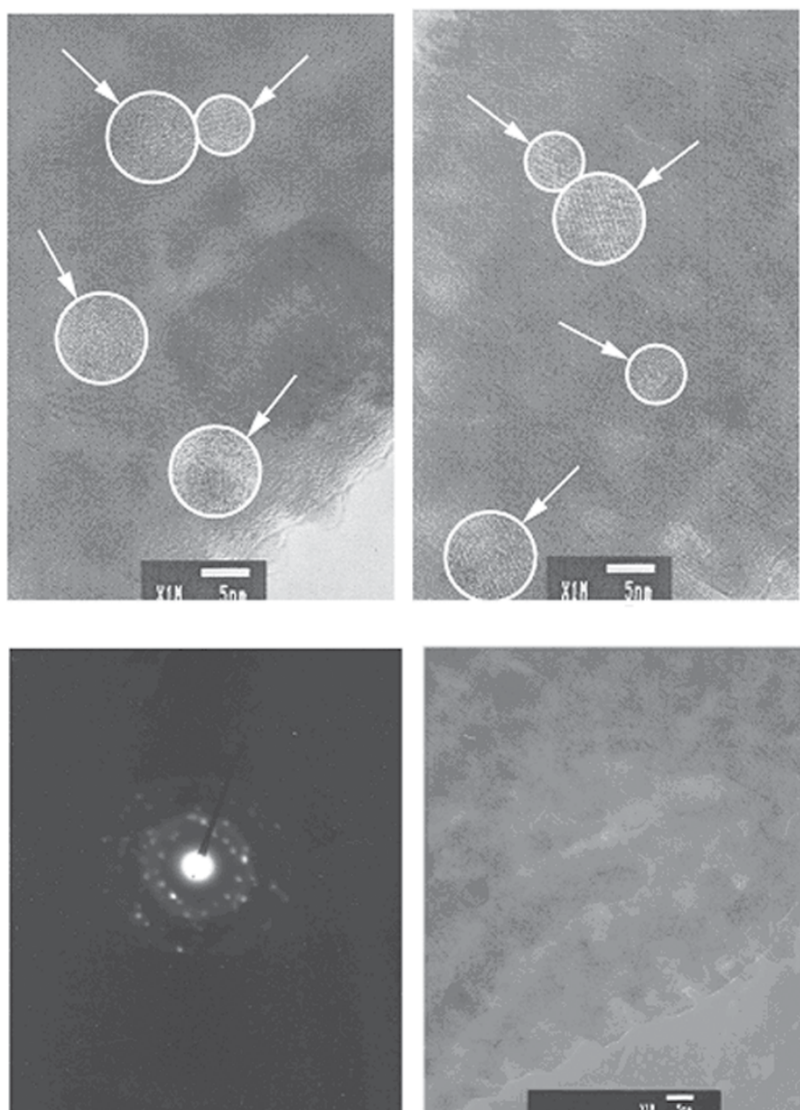


Рис. 10. Нанокристаллическая структура с разрешением атомных рядов (см. стрелки) на стали 4X5MФ1С после ультразвукового упрочнения, выявленная методом электронной микроскопии высокого разрешения ( $\times 10^6$ )



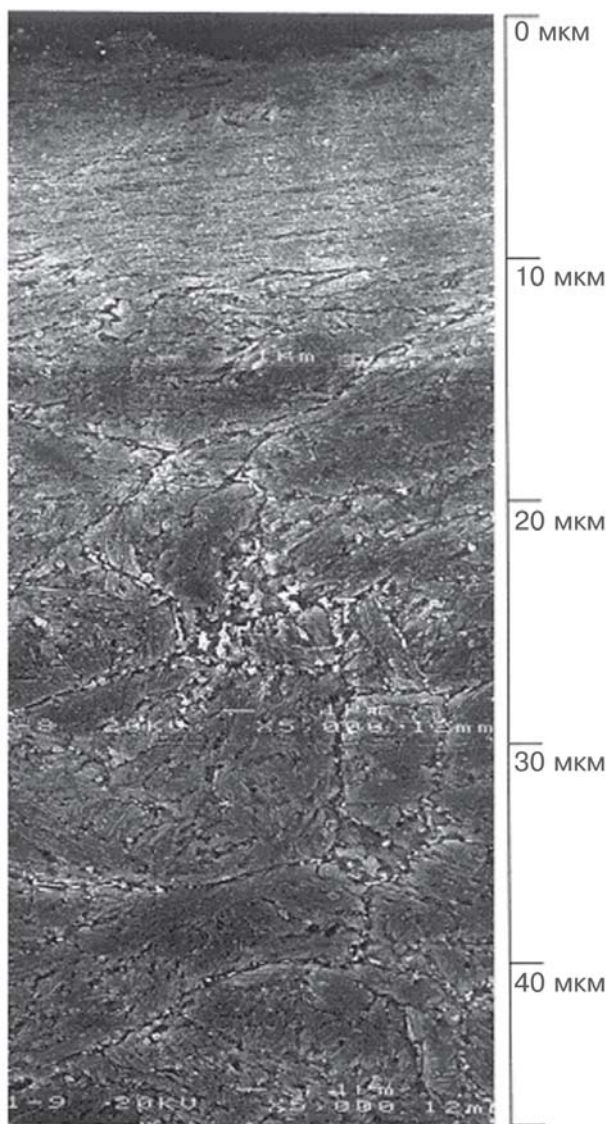


Рис. 11. Изменение структуры стали 4X5MФ1С после УЗО от поверхности (верхняя часть рисунка) в глубину материала

меров и любой геометрии на глубинах 15–20 мкм при использовании компьютеризированной ультразвуковой технологии.

Ультразвуковая финишная и упрочняющая обработка металлических материалов позволяет получить 10–12 класс чистоты поверхности с одновременным ее упрочнением по сравнению с исходным состоянием за счет получения нанокристаллических структур на любых массивных деталях (валы прокатных станков, штампы, плунжера и др.) с размером зерна 5–10 нм на глубинах 15–20 мкм и микрокристаллических структур на глубинах до 250–300 мкм от поверхности, что существенно повышает твер-

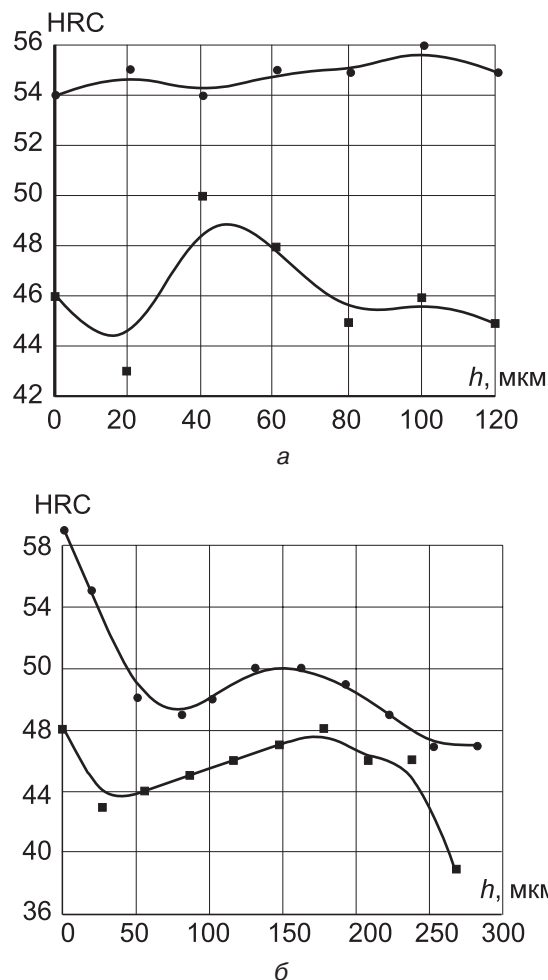


Рис. 12. Изменение микротвердости HRC металла от поверхности материала детали в глубину: а – плунжер из стали 4X5MФ1С; б – вал прокатного стана; ■ – до УЗО; ● – после УЗО

дость, прочность, износостойкость и ресурс работы различных деталей и узлов.

Изменение структуры от поверхности и в глубину материала после ультразвуковой обработки представлено на рис. 11, а изменение микротвердости – на рис. 12 а,б. Например, для стали 4X5MФ1С, имеющей после закалки твердость 46–48 HRC, ультразвуковая обработка повышает уровень твердости до 62–64 HRC. Для ряда других инструментальных материалов, имеющих исходную твердость 54–55 HRC, УЗО поднимает ее значение до 69–71 HRC.

На рис. 13 представлено изменение микротвердости стали 4X5MФ1С от температуры нагрева до УЗО и после УЗО с амплитудой 10 мкм.

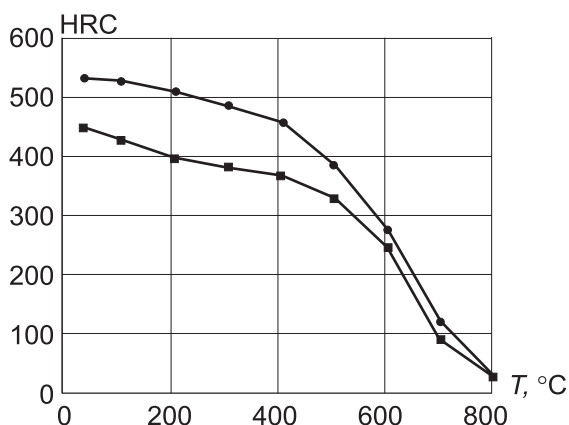


Рис. 13. Изменение микротвердости стали 4X5MФ1С от температуры нагрева ( $A=10$  мкм):  
 —■— до УЗО; —●— после УЗО

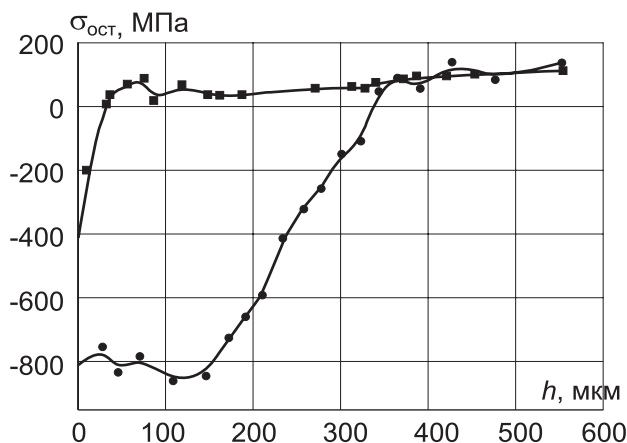


Рис. 15. Распределение остаточных напряжений от поверхности в глубину обработанного УЗО материала (сталь 4X5MФ1С):  
 —●— до УЗО; —■— после УЗО

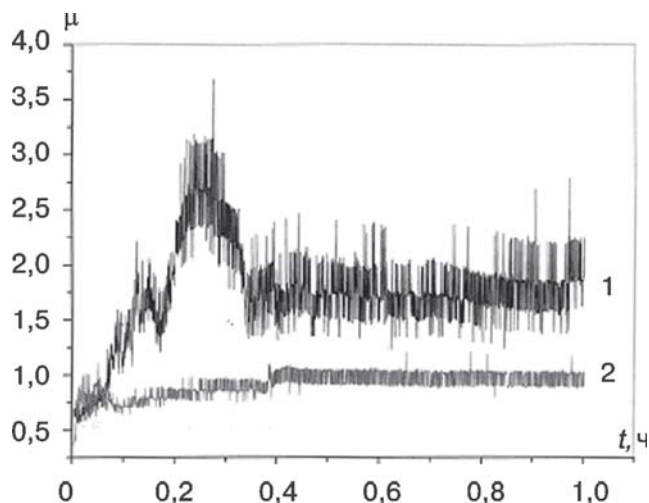


Рис. 14. Изменение коэффициента трения от времени испытания:  
 1 – до УЗО; 2 – после УЗО

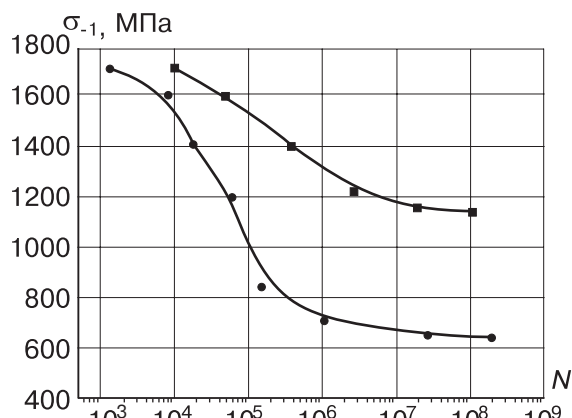


Рис. 16. Кривые усталостной прочности стали 4X5MФ1С:  
 —●— до УЗО; —■— после УЗО

Величина шероховатости снижается до 0,05–0,08 мкм, понижая коэффициент трения более чем в 2 раза (рис. 14), увеличивая тем самым износостойкость деталей. При этом в поверхностных слоях на глубинах до 150–200 мкм возникают остаточные напряжения сжатия (рис. 15), резко повышающие предел хрупкой и усталостной прочности (рис. 16). Процессы рекристаллизации при такой обработке практически заторможены, поскольку обработка ведется с охлаждением смазочно-охлаждающей жидкостью.

### Заключение

Предлагаемая технология поверхностной упрочняющей УЗО массивных деталей из закаленных конструкционных и инструментальных

сталей для получения высокой твердости и прочности материала 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. (рис. 17). При этом достигается высокая степень автоматизации процесса за счет применения компьютеризированной технологии.

Технология УЗО выполняет функции не только поверхностного упрочнения, но и финишной обработки поверхности, когда величину микрогеометрии  $R_z$  можно довести до сотых долей микрона. При этом весьма ценным является то об-



Рис. 17. Ассортимент деталей, обработанных УЗО

стоятельство, что данный способ позволяет получать регламентированную шероховатость поверхности, когда размер, форму и общую плотность «масляных карманов» и соответственно маслостойкость поверхности можно целенаправленно регулировать, изменяя в соответствующих

пределах технологические параметры процесса.

Таким образом, созданная новая нанотехнология, в первую очередь, для получения высокопрочных материалов крупногабаритных изделий является весьма перспективной для многих отраслей машиностроения.

### **Список литературы**

1. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
2. Алехин В.П., Алехин О.В. Физические закономерности микропластической деформации поверхностных слоев материалов // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 9. С. 24–31.
3. Алехин В.П. 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.). 2004. С. 12–19.
4. Алехин В.П., Боровин Ю.М., Жаркий С.М. и др. Повышение эксплуатационных свойств деталей транспортного машиностроения способом ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки // Сб. докл. Международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем-2003». – Ростов-на-Дону, сент. 2003. Т. 1. С. 35–38.
5. Алехин В.П., Пьен Й.С., Ким Ч.С., Сонг Й.В. 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. 1. С. 22–24.
6. Алехин В.П., Алехин О.В. Резервы повышения физико-механических свойств материалов и изделий после поверхностной упрочняющей обработки // Сб. докл. Международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем-2003». – Ростов-на-Дону, сент. 2003. Т. 1. С. 39–40.
7. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом // Сб. научных трудов «Повышение долговечности сталей методом поверхностного наклепа». – М.: ЦНИТМАШ. 1965. Кн. 108. С. 64–72.
8. Ан Г.Д. Исследование процесса ультразвукового упрочнения высокопрочных авиационных материалов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Куйбышев: КУАИ, 1969. – 21 с.
9. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
10. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 265 с.
11. Муханов И.И., Голубев Ю.М. Поверхностный слой стальных деталей машин после ультразвуковой чистовой и упрочняющей обработки // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 1969. № 9. С. 29–32.
12. Асанов В.Б. Качество поверхностного слоя деталей машин и его особенности после упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1972. – 32 с.