

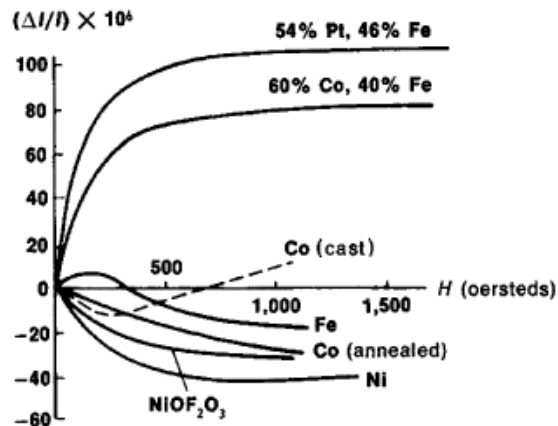
МЕТАЛЛЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ: ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЦЕССЫ

МОДУЛЬ 2. Процессы и методы формирования наноструктурных состояний в конструкционных материалах

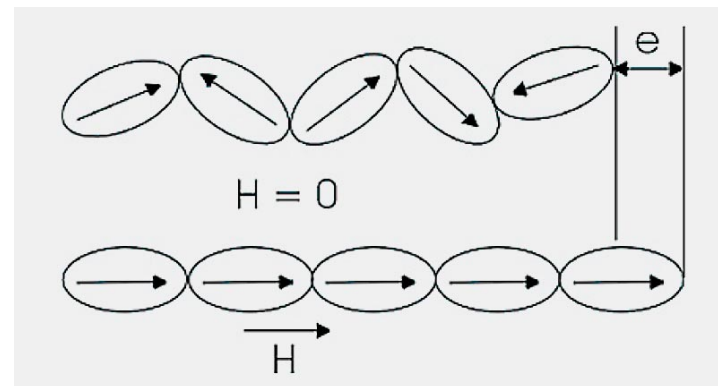
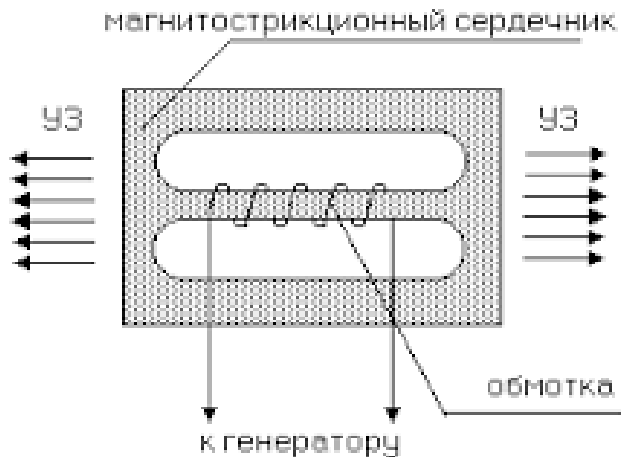
Лекция 8

Ультразвуковая ударная обработка. Закономерности изменения морфологии поверхности и микроструктуры поверхностных слоев конструкционных материалов.

Магнитострикция - изменение линейных размеров твердого тела под действием магнитного поля.



Зависимость продольной магнитострикции ряда поликристаллических металлов, сплавов и соединений от напряжённости магнитного поля.



Существуют **металлические** и **ферритовые** магнитострикционные материалы.

Из **металлических** магнитострикционных материалов наиболее часто используются никель и сплавы на его основе (Ni-Co, Ni-Si), а также железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы.

Их изготавливают по обычной металлургической технологии, прокатывая в виде полос толщиной 0,1-0,3 мм для уменьшения потерь на вихревые токи.



Редкоземельные магнитострикционные материалы - соединения редкоземельных элементов [тербия (Tb), диспрозия (Dy)] с железом.

Магнитострикция их очень велика - до 10^{-3} - 10^{-2} , однако она достигается в магн. полях, составляющих десятки и сотни кА/м.

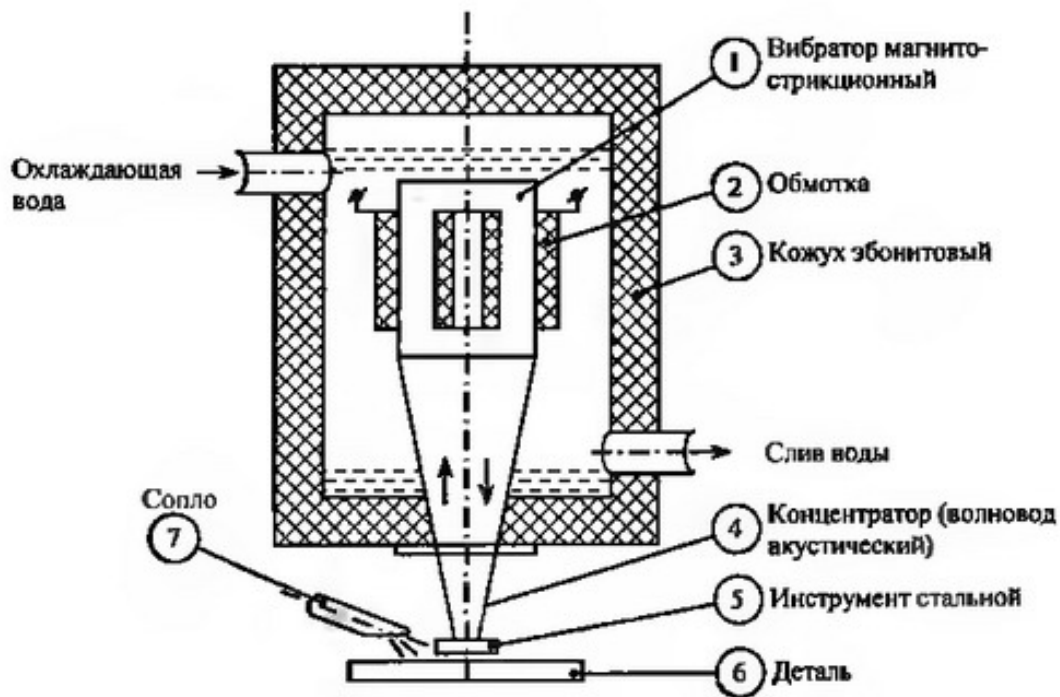
Получают образцы сплавов на основе редкоземельных элементов методом вытягивания из расплава или методами порошковой металлургии.

Ферритовые магнитострикционные материалы

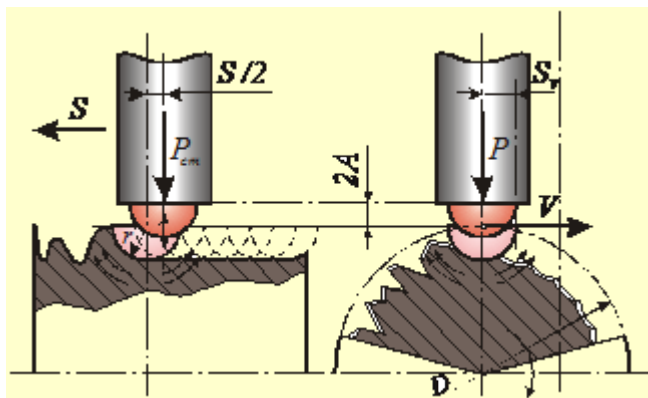
- ферриты со структурой шпинели (феррит никеля) и твердые растворы на его основе (включающие ферриты кобальта, цинка, меди и др. добавки)
- ферриты со структурой граната - в основном феррит-гранат иттрия.

Ферриты-шпинели употребляют в виде поликристаллической керамики, которая изготавливается из окислов (реже солей) металлов по керамической технологии, в форме монолитных сердечников;

ферриты-гранаты выращивают из расплава в виде монокристаллов.

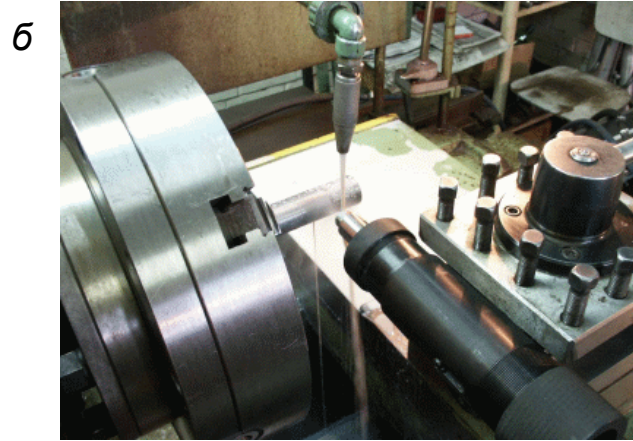
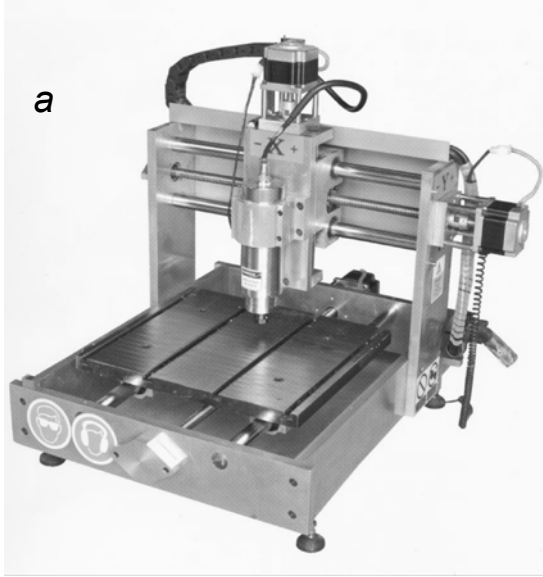


Процесс ультразвуковой обработки характеризуется следующими факторами:



- формой и радиусом r рабочей части инструмента;
- амплитудой колебаний индентора;
- величиной силы прижима инструмента к детали;
- величиной динамического воздействия;
- подачей;
- числом прохода инструмента;
- окружной или линейной скоростью заготовки;
- применяемой смазочно-охлаждающей жидкостью

Ультразвуковая ударная обработка (Ultrasonic impact treatment)



Оборудование для ультразвуковой финишной (а, б) и ударной обработок (в)

Поверхностное пластическое деформирование ультразвуковым инструментом в технической литературе имеет несколько названий:

- ультразвуковая финишная обработка,
- безабразивная ультразвуковая финишная обработка,
- ультразвуковая упрочняющая обработка,
- ультразвуковая импульсная упрочняюще-чистовая обработка,
- ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка,
- ультразвуковая ударная обработка,
- и др.



Сравнение магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей



Магнитострикционные преобразователи



Пьезокерамических преобразователей

Эксплуатационные характеристики никогда не ухудшаются

Припаянные преобразователи никогда не отсоединяются

Соединение металл-металл обеспечивает более эффективную передачу энергии

Мощные диафрагменные излучатели никогда не изнашиваются (из-за кавитационной эрозии)

Большая масса – не чувствительны к изменениям нагрузки

Единственный случай пожизненной гарантии в промышленности!

Мощность единичного излучателя до 5 кВт

Эксплуатационные характеристики ухудшаются

Приклеенные преобразователи отсоединяются

Клееное соединение гасит преобразование энергии

Легкие диафрагменные излучатели изнашиваются (из-за кавитационной эрозии)

Меньшая масса – чувствительны к изменениям нагрузки

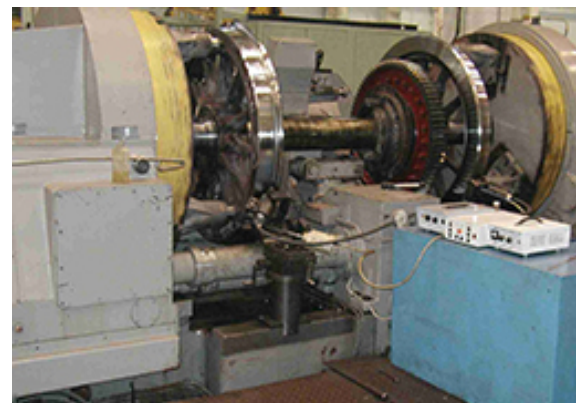
Даже не приближаются к магнитострикционным

Мощность единичного излучателя не превосходит нескольких сотен Ват

Вопрос. Тогда почему все не используют магнитострикционные преобразователи?

Ответ. Из-за более высокой стоимости технологии производства магнитострикционных преобразователей и высоких требований к инженерной квалификации, предъявляемых для их оптимального использования. Большинство производителей ультразвуковых систем используют собираемые вручную пьезоэлектрические преобразователи более низкого качества.

Образцы обработанных изделий



В отличие от дробеструйной, пескоструйной, SMAT и других технологий упрочнения, основанных на пластической деформации поверхностных слоев, УЗО позволяет контролировать силу и плотность ударов, а, следовательно, более эффективно обрабатывать поверхность материалов.

Кроме этого, УЗО не требует сложного оборудования, характеризуется способностью обрабатывать труднодоступные локальные области и детали любой формы и размеров.

Образцы обработанных изделий




По обработке большинства марок сталей, а также большинства марок цветных металлов и их сплавов получены следующие результаты:

- шероховатость поверхности от исходной Ra 1,6 получаем Ra 0,05;
- повышение в среднем микротвёрдости на 50...80 % на глубину до 0,8 мм;
- преобразование остаточных напряжений из растягивающих (+5,7) в сжимающие (−53,2);
- увеличение опорной поверхности до 85 %;
- повышение усталостной прочности в 1,5...2 раза;
- повышение износостойкости в 2...2,5 раза;
- повышение коррозионной стойкости.

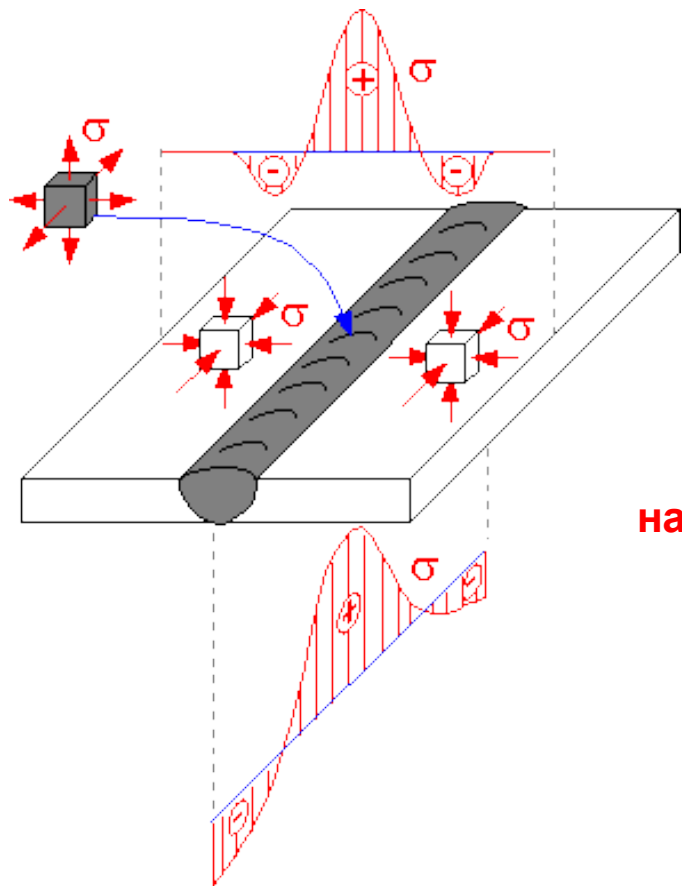
Ультразвуковая обработка сварных соединений



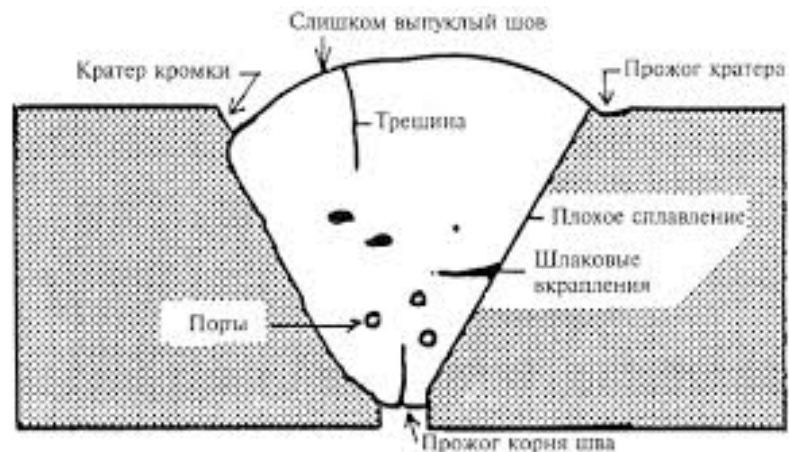
ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ ШВОВ

НАИМЕНОВАНИЕ	ПРИЧИНА	НАИМЕНОВАНИЕ	ПРИЧИНА
КРАТЕРЫ 	<ul style="list-style-type: none">- Обрыв дуги- Неправильное выполнение конечного участка шва	ПОДРЕЗЫ 	<ul style="list-style-type: none">- Большой сварочный ток- Длинная дуга- При сварке угловых швов - смещение электрода в сторону вертикальной стенки
ПОРЫ 	<ul style="list-style-type: none">- Быстрое охлаждение шва- Загрязнение кромок маслом, ржавчиной и т.п.- Непросушенные электроды- Высокая скорость сварки	НЕПРОВАР 	<ul style="list-style-type: none">- Малый угол скоса вертикальных кромок- Малый зазор между ними- Загрязнение кромок- Недостаточный сварочный ток- Завышенная скорость сварки
ВКЛЮЧЕНИЯ ШЛАКА 	<ul style="list-style-type: none">- Грязь на кромках- Малый сварочный ток- Большая скорость сварки	ПРОЖОГ 	<ul style="list-style-type: none">- Большой ток при малой скорости сварки- Большой зазор между кромками- Под свариваемый шов плохо поджата флюсовая подушка или медная подкладка

Высокие растягивающие напряжения – одна из основных проблем сварных соединений!



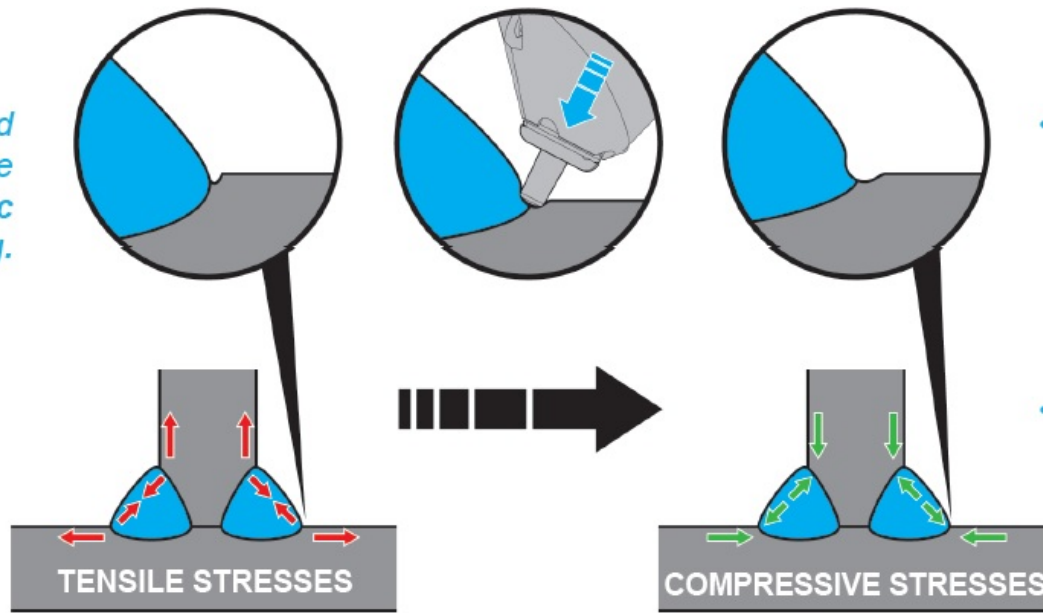
УЗО приводит к формированию сжимающих напряжений, а также позволяет обработать кромку шва



Типичное распределение остаточных напряжений на сварном шве пластины

Ультразвуковая обработка сварных соединений

- Weld toe notch area and heat affected zone to be treated by **Ultrasonic Needle Peening**.

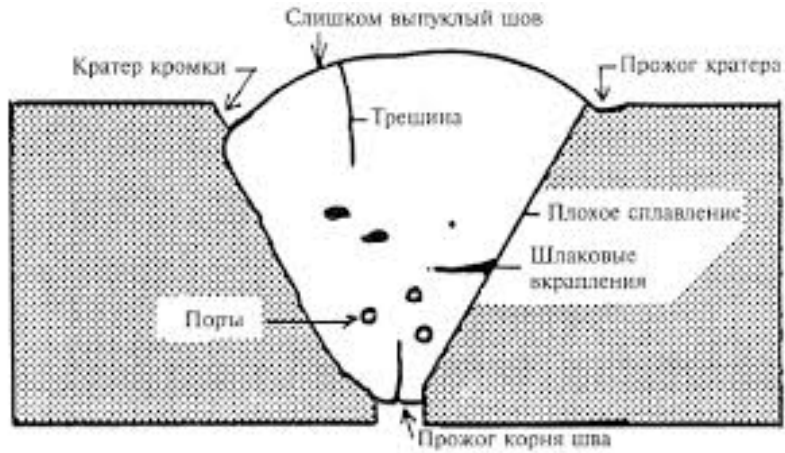


- Weld toe geometry modification

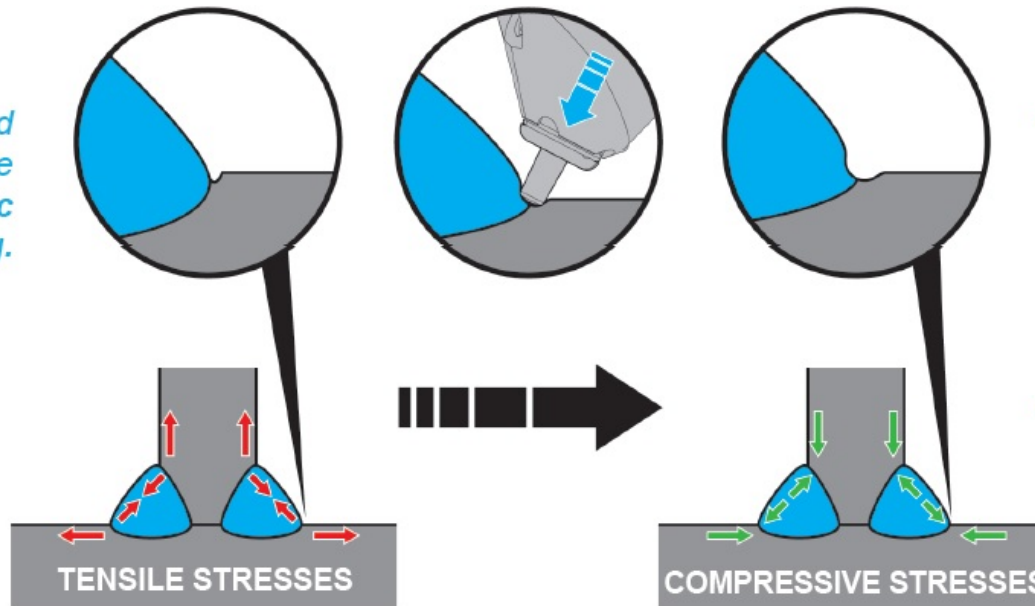
- Inversion of Residual Stresses



Ультразвуковая обработка сварных соединений

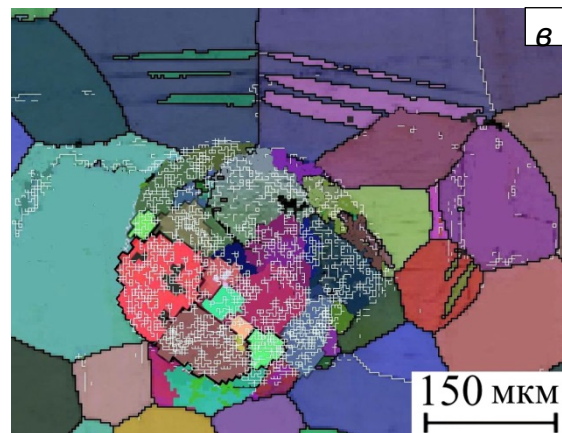
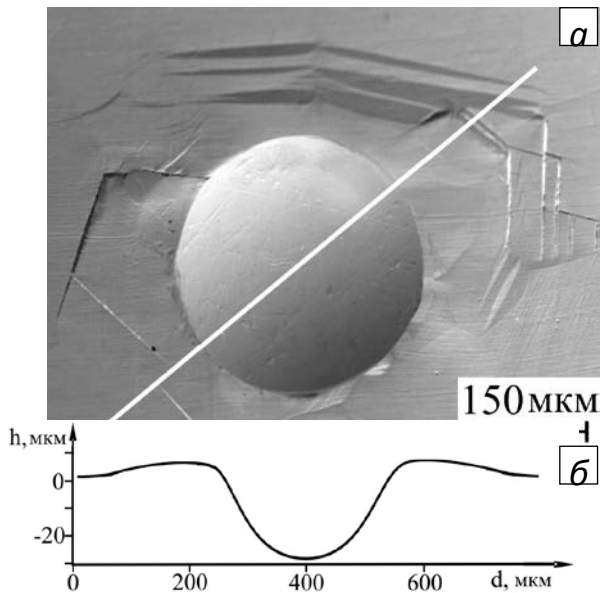


- *Weld toe notch area and heat affected zone to be treated by Ultrasonic Needle Peening.*

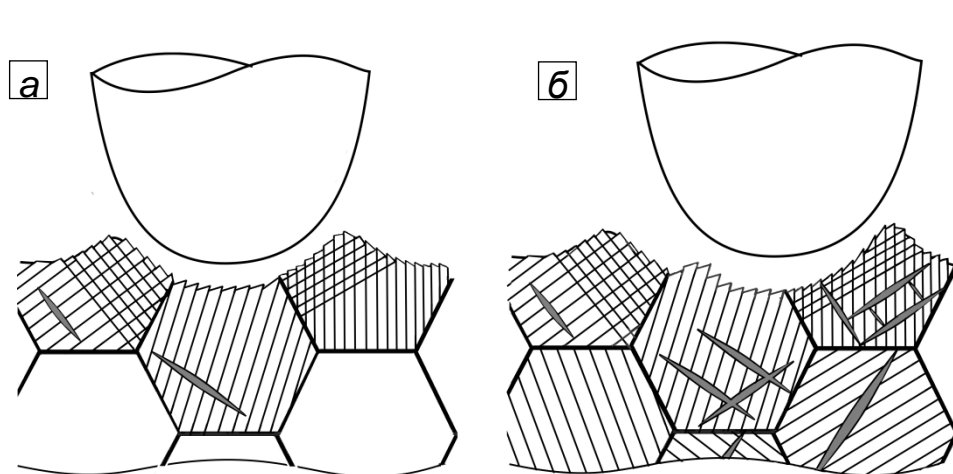


- *Weld toe geometry modification*

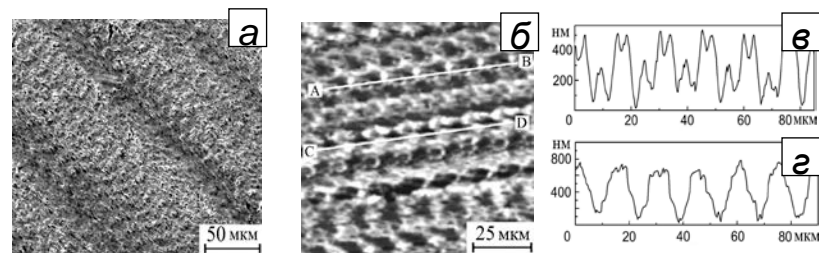
- *Inversion of Residual Stresses*



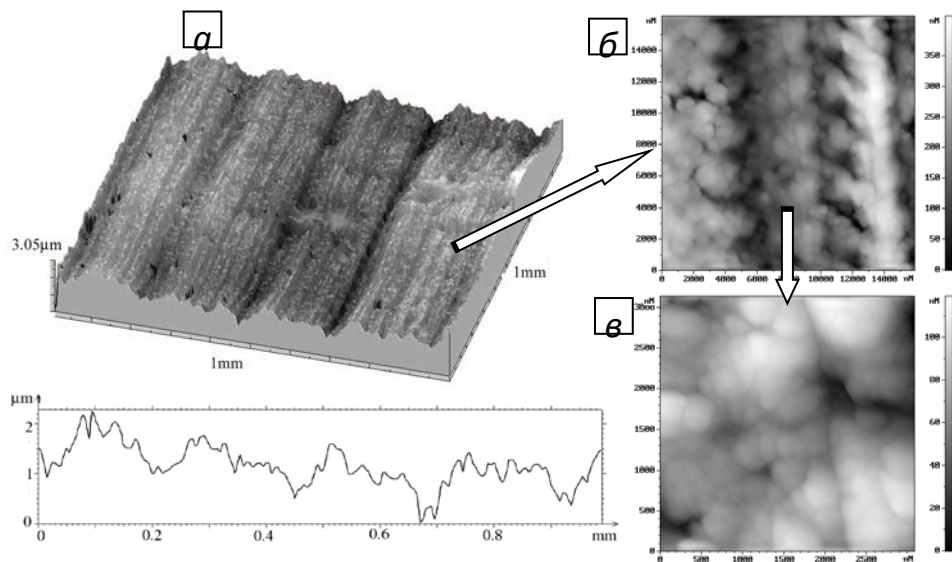
Морфология поверхности (а), соответствующая профилограмма (б) и EBSD-карта образца VT1-0 (в) в области пятна контакта, сформированного единичным ударом шарика диаметром 1 мм



Пластическое оттеснение поверхностного слоя VT1-0 после первого (а) и последующего ударов (б)

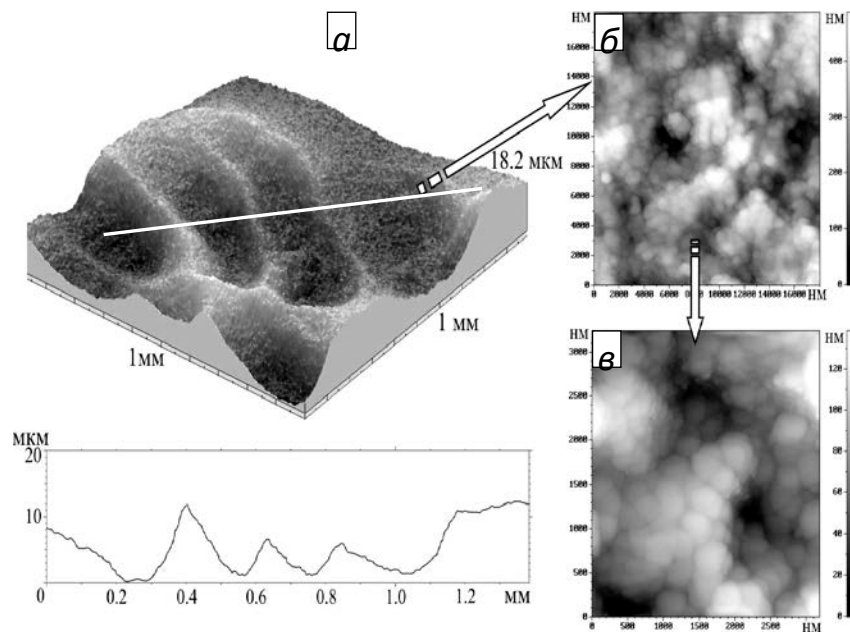


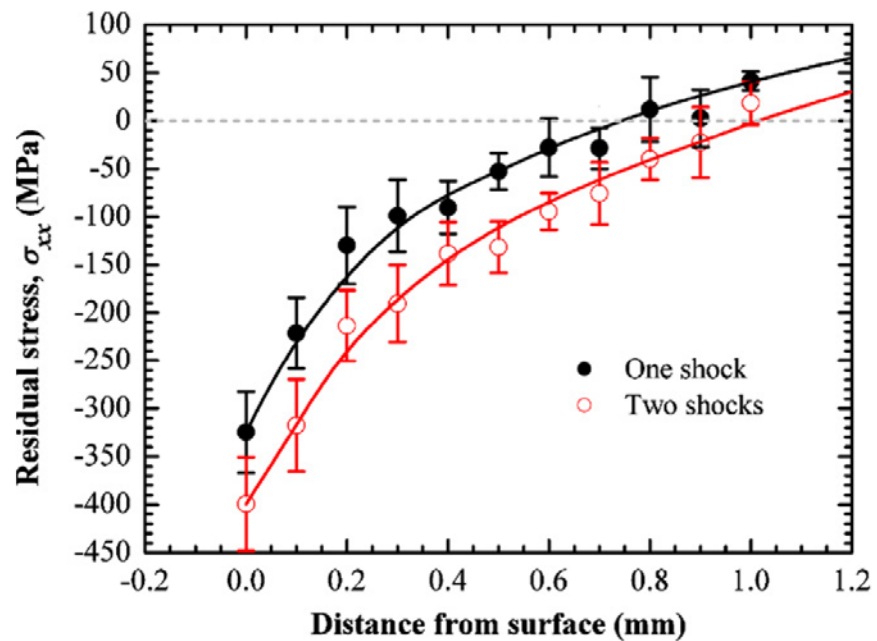
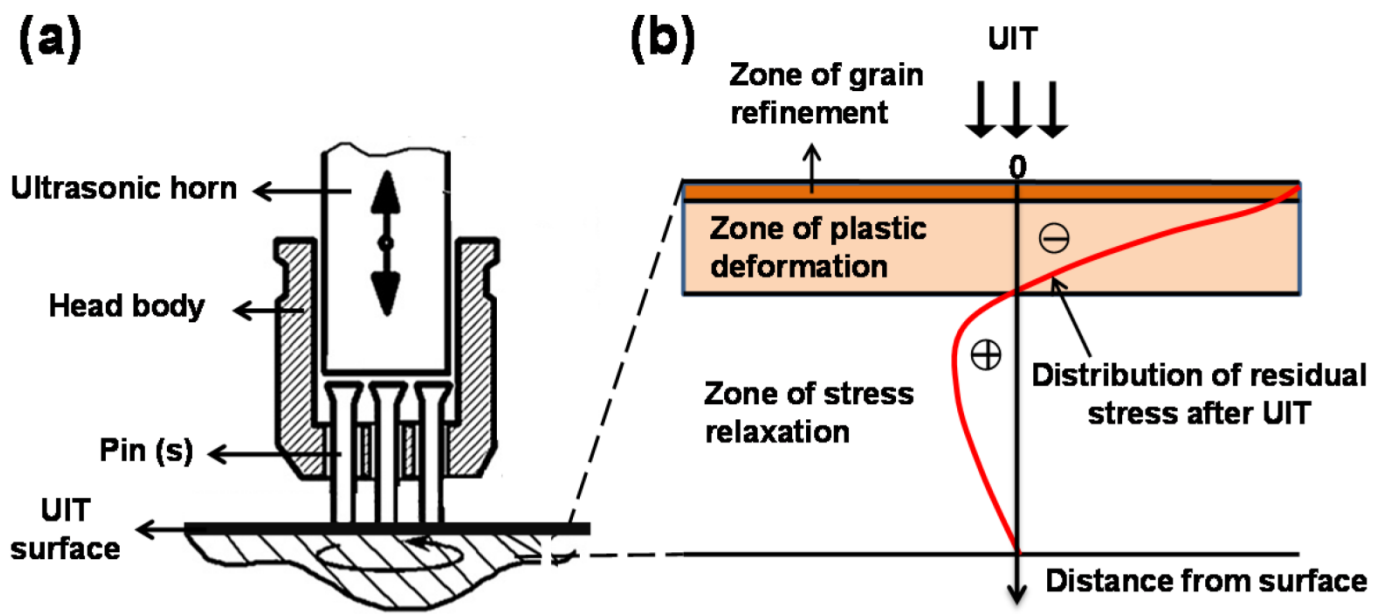
РЭМ- (а) и АСМ-изображения (б) и соответствующие профили АВ (в) и CD (г) поверхности образцов титана VT1-0, подвергнутого УЗО



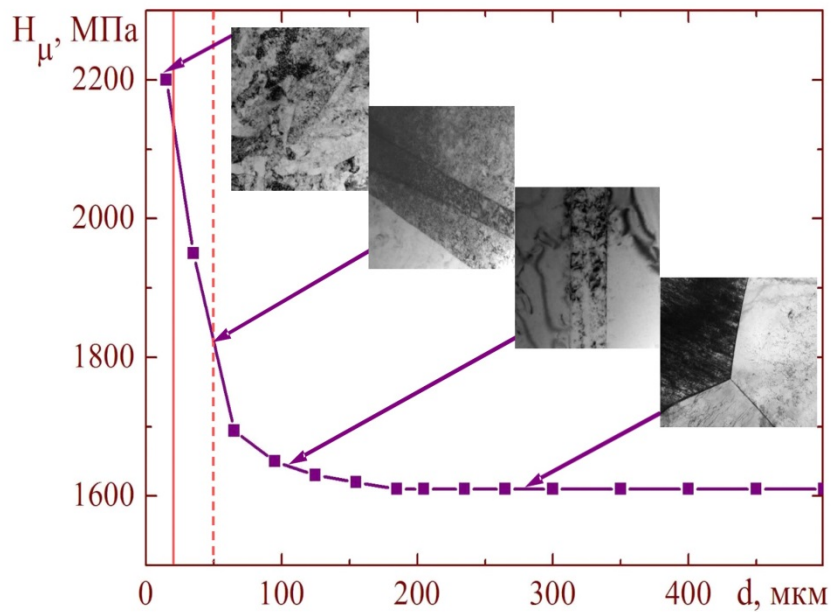
Морфология поверхности титанового сплава ВТ6, подвергнутого ультразвуковой финишной обработке. Изображения получены методом лазерной профилометрии (а) и атомно-силовой микроскопии (б, в)

Морфология поверхности образцов титанового сплава ВТ6, подвергнутого ультразвуковой ударной обработке. Изображения получены методом лазерной профилометрии (а) и атомно-силовой микроскопии (б, в)

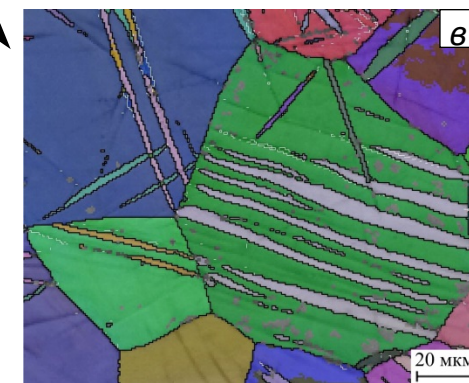
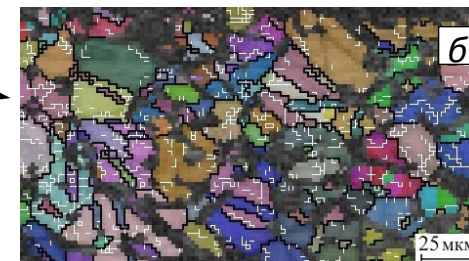
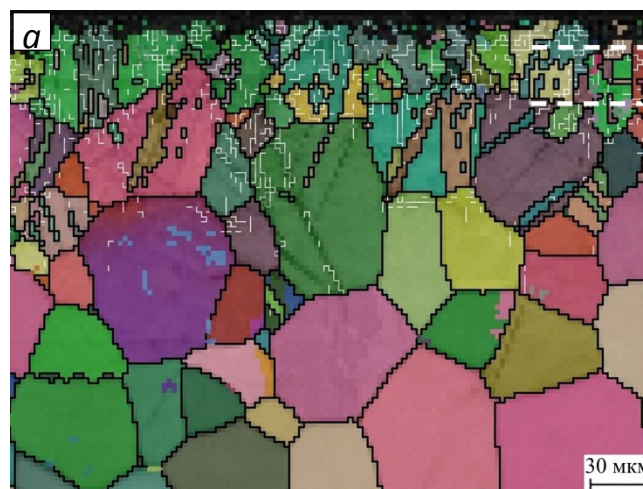




Изменение сжимающих напряжений в поверхностном слое титанового сплава VT6



Распределение микротвердости по боковой грани образцов BT1-0, подвергнутых УЗО

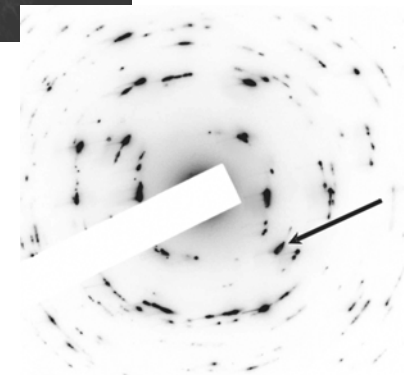
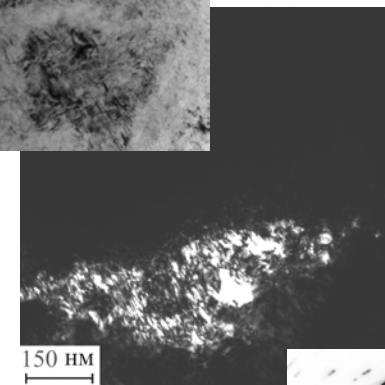
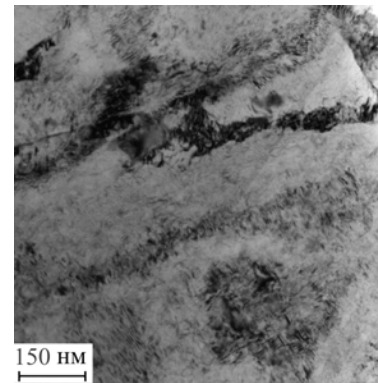
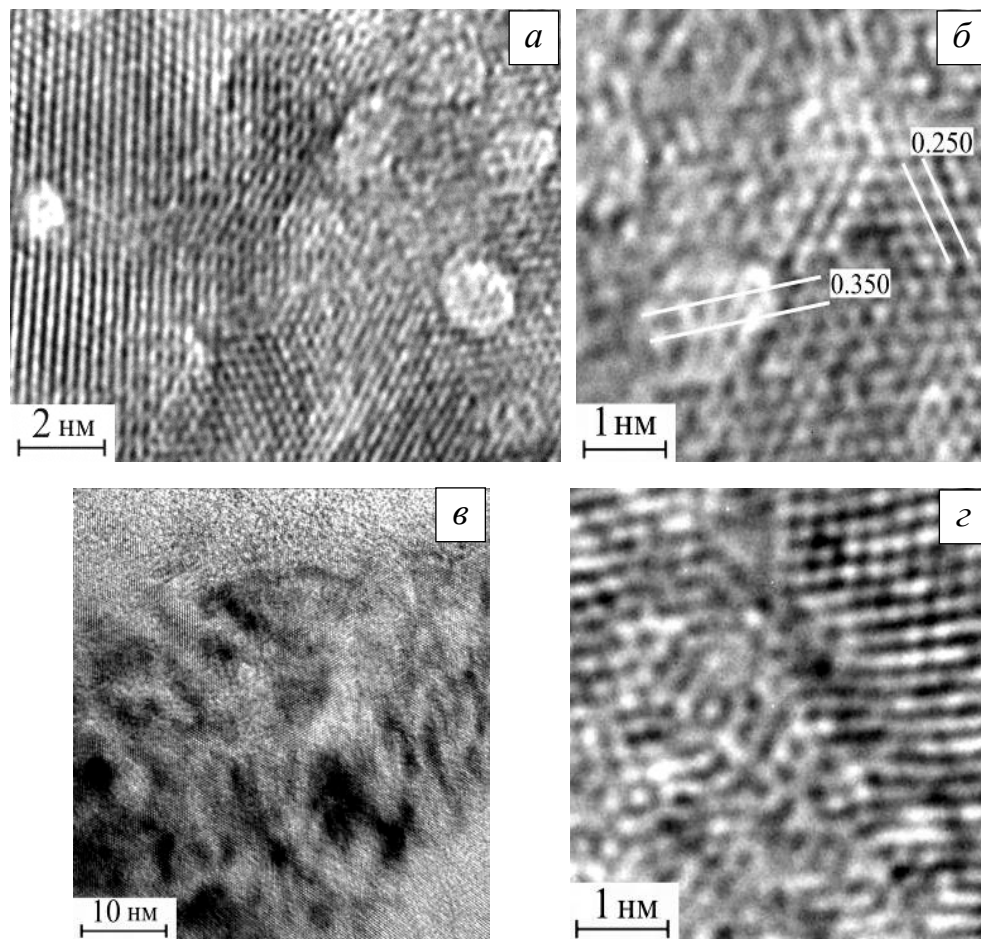


Микроструктура образца BT1-0, подвергнутого УЗО;

а - EBSD-карта боковой грани;

б, в - EBSD-карты плоской поверхности, полученные на глубине 20 и 50 мкм соответственно

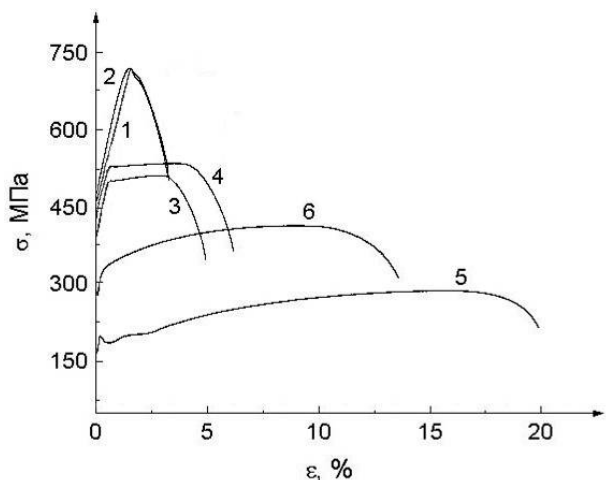
Формирование карбидов титана в процессе ультразвуковой обработки



Электронно-микроскопические изображения высокого разрешения микроструктуры поверхностного слоя образца VT1-0, сформированной в процессе УЗО на глубине 5-10 мкм

Светлопольное (а) и темнопольное ПЭМ-изображения (б), а также микроэлектронограмма (в) микроструктуры поверхностного слоя образца VT1-0, сформированной в процессе УЗО на глубине 5-10 мкм. Темнопольное изображение получено в близкорасположенных рефлексах 111 и $011_{\alpha-Ti}$ (указаны стрелкой)

Влияние исходной микроструктуры материала на эффект ультразвуковой обработки



Кривые «напряжение – деформация»

Армко-Fe:

1 – прокат,

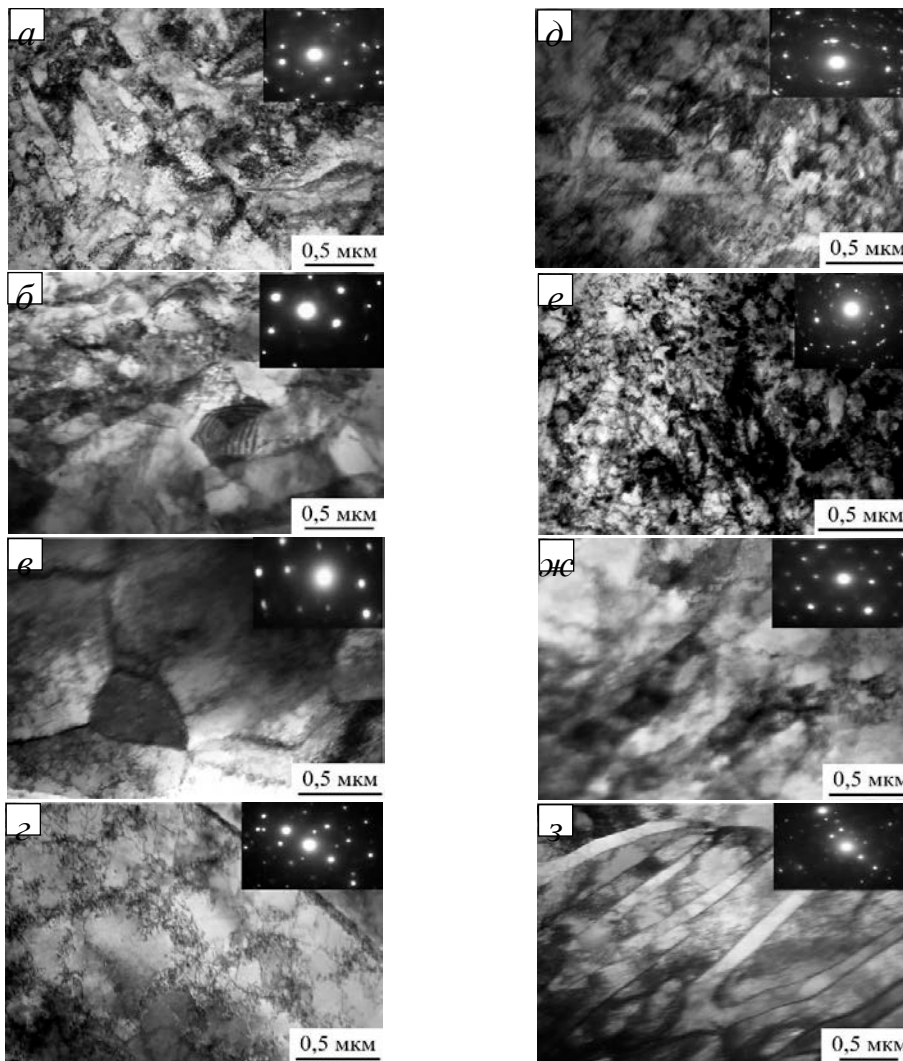
2 – прокат + УЗО,

3 – прокат + отжиг (400 °С),

4 – прокат + отжиг (400 °С) + УЗО,

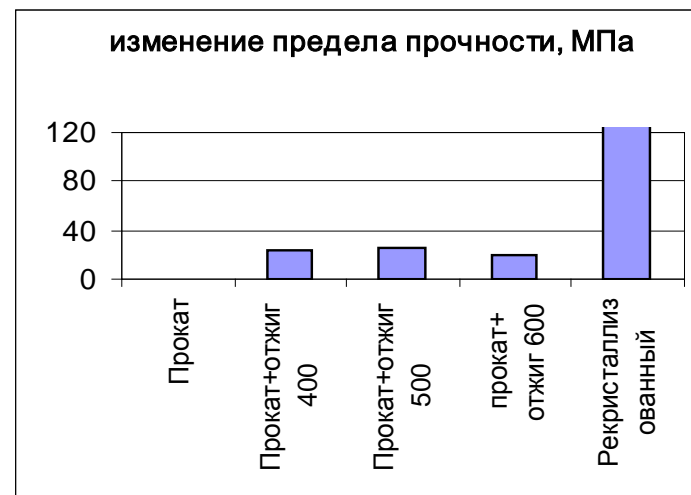
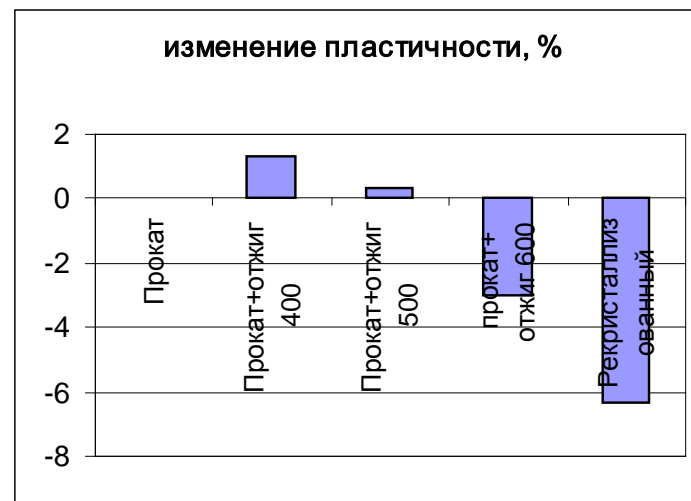
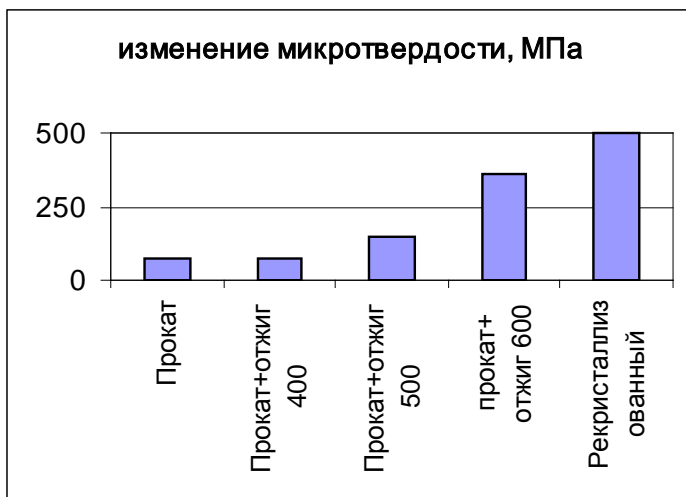
5 – прокат + отжиг (800 °С),

6 – прокат + отжиг (800 °С) + УЗО



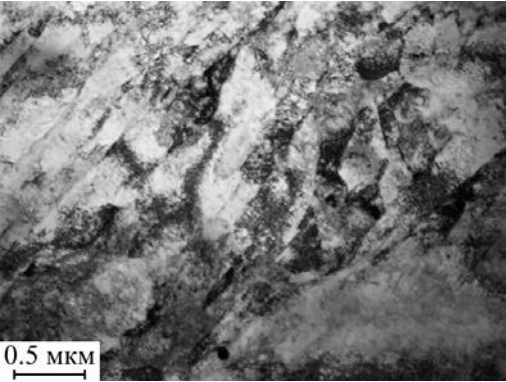
Светлопольные ПЭМ-изображения и соответствующие микроэлектроннограммы поверхностных слоев образцов Армко-Fe после проката (а, д), отпуска при температурах $T = 400$ (б, е), 600 (в, ж) и 800 °С (г, з) до (а-г) и после УЗО (д-з)

Влияние исходной микроструктуры материала на эффект ультразвуковой обработки

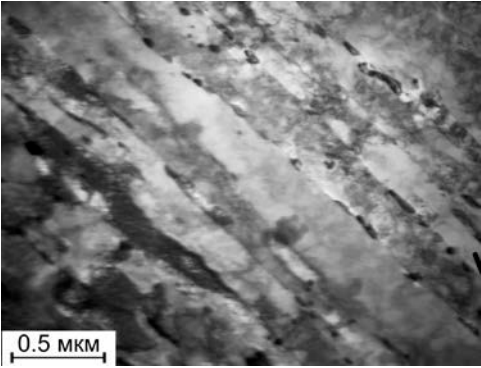


Изменение механических свойств образцов армко-железа, находящихся в различном структурном состоянии, под действием ультразвуковой обработки

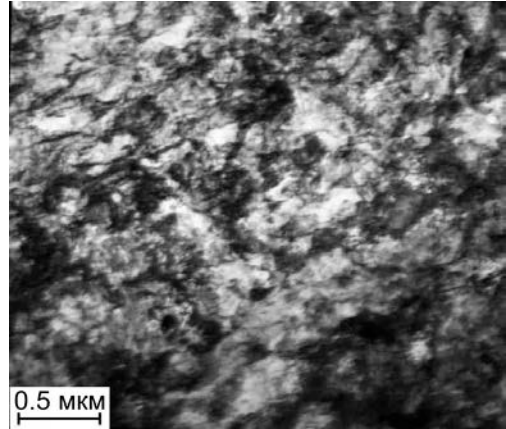
Влияние последовательности проведения ультразвуковой и термической обработок на микроструктуру в поверхностных слоях стали ЭК-181



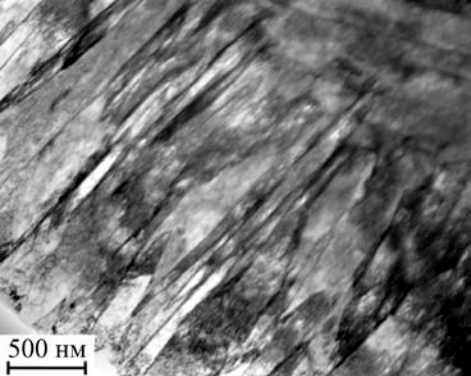
Закалка



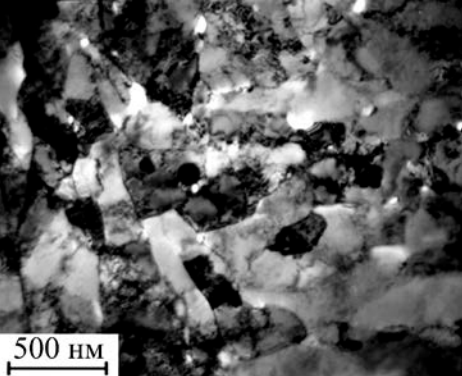
Закалка + старение



Закалка + УЗО + старение



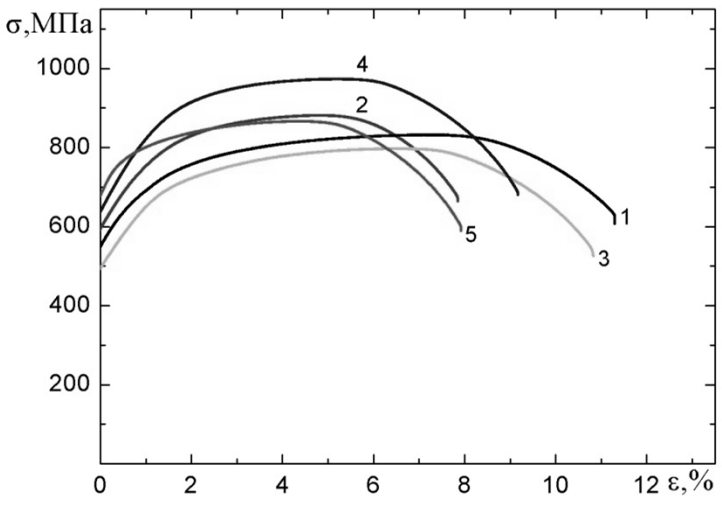
Закалка + УЗО



Закалка + старение + УЗО

*Закалка (1080°C, 1 час)
Старение (720°C, 3 часа)*

Влияние последовательности проведения ультразвуковой и термической обработок на механические характеристики стали ЭК-181

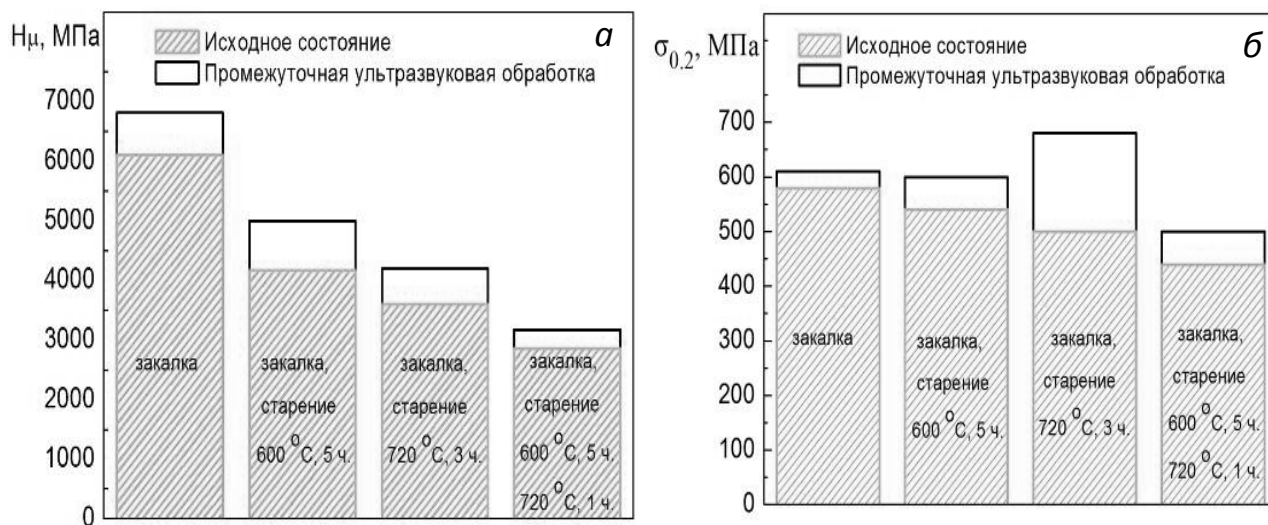


Кривые “напряжение – деформация” образцов стали ЭК-181, растяжение при комнатной температуре:
 1 – закалка;
 2 – закалка, УЗО;
 3 – закалка, старение;
 4 – закалка, старение, УЗО;
 5 – закалка, УЗО, старение

Механические свойства (микротвердость H_{μ} , предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , максимальное удлинение до разрушения ϵ_{max}) стали ЭК-181, подвергнутой различным сочетаниям термической и ультразвуковой обработок

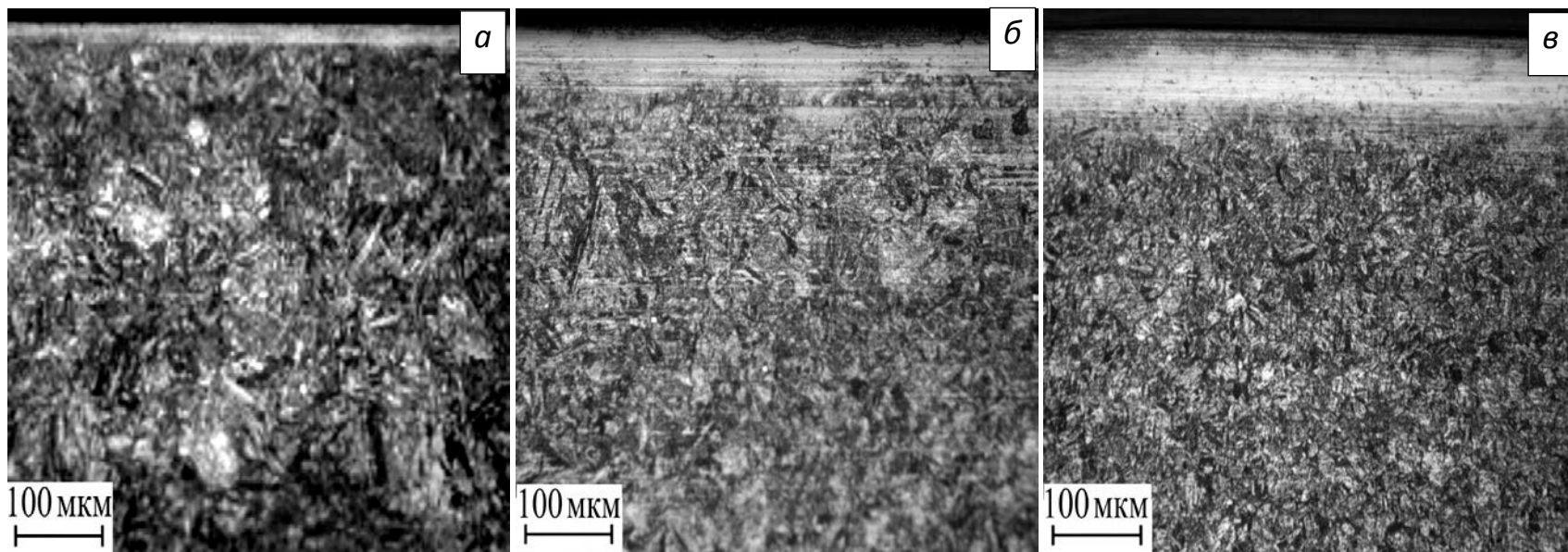
Вид обработки	H_{μ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_{max} , %
Закалка	6100	580	830	11
Закалка+УЗО	6800	610	880	8
Закалка+старение	3600	500	800	11
Закалка+старение+УЗО	4500	640	980	9
Закалка+УЗО+старение	4200	680	870	8

Влияние исходной микроструктуры материала на эффект ультразвуковой обработки



Микротвердость (а) и предел текучести (б) стали при различных режимах термической и механической обработок

Влияние предварительной ультразвуковой обработки на глубину азотированного слоя стали ЭК-181



Оптические изображения боковой грани образцов стали ЭК-181, подвергнутых закалке, старению и азотированию (а), а также закалке, УЗО, азотированию и старению (б, в). Температура азотирования составляет 600 (а, б) и 700 °С (в)