Современные методы модифицирования поверхности и нанесения покрытий

Как известно, в большинстве случаев работоспособность деталей машин зависит от свойств поверхностного слоя.

Задачами оптимизации строения и свойств поверхностных слоев деталей занимается научное направление Инжиниринг поверхности.

Большой вклад в развитие данного направления внесли российские научные школы А.М. Дальского, А.Г. Суслова, В.М. Смелянского и других.

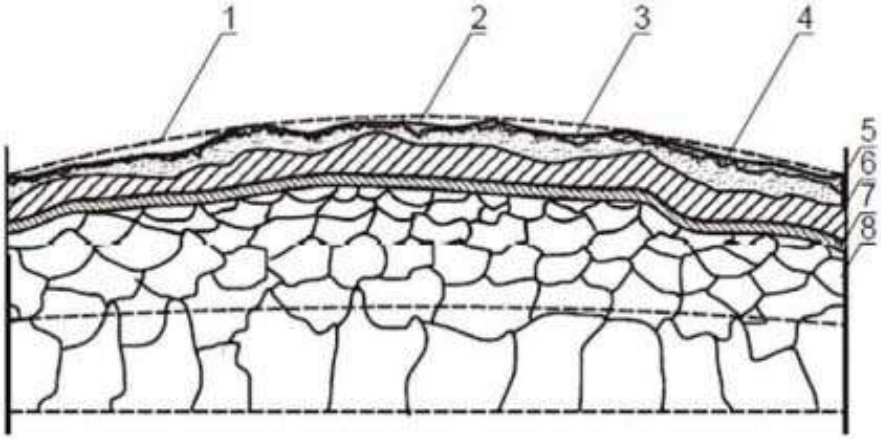
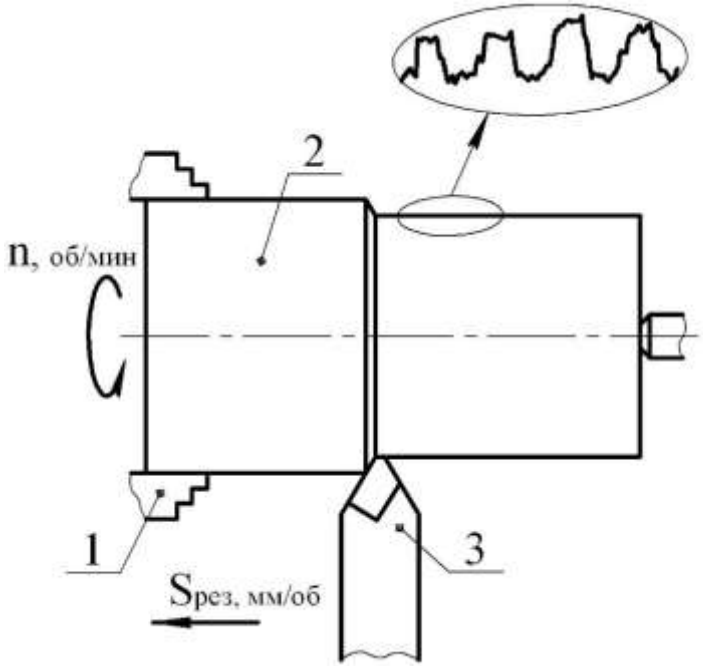
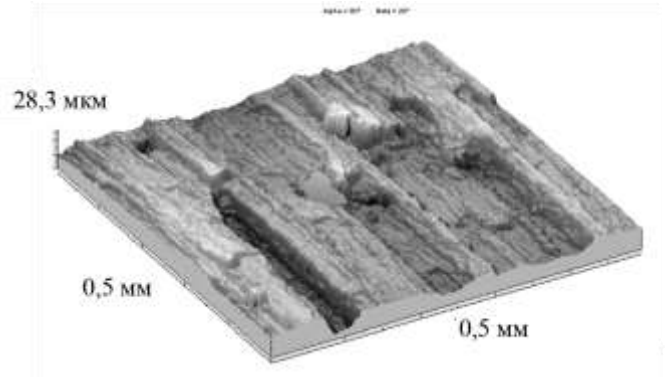


Рисунок 1 - Схематичное изображение поверхностного слоя детали: 1- макроотклонение; 2 – волнистость; 3 – шероховатость; 4 – субшероховатость; 5 – адсорбированная зона; 6 – зона оксидов; 7 – граничная зона; 8 – зона с измененными физико-механическими свойствами.

Состояние поверхности после резания

Схема резания на токарном станке





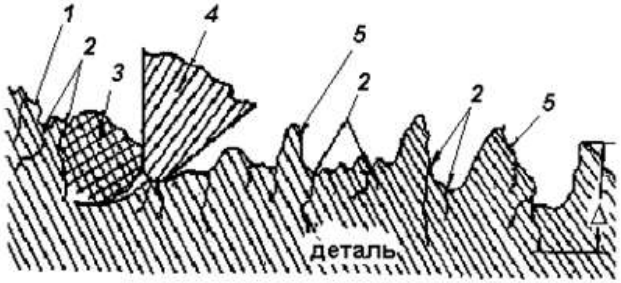


Схема образования микротрещин при механической обработке детали: *1* – микропрофиль детали перед обработкой; *2* – микротрещины; *3* – элементарная порция (элементарный блок) стружки; *4* – резец; *5* – микропрофиль детали после обработки; Δ – глубина проникновения микротрещин по линии сдвига

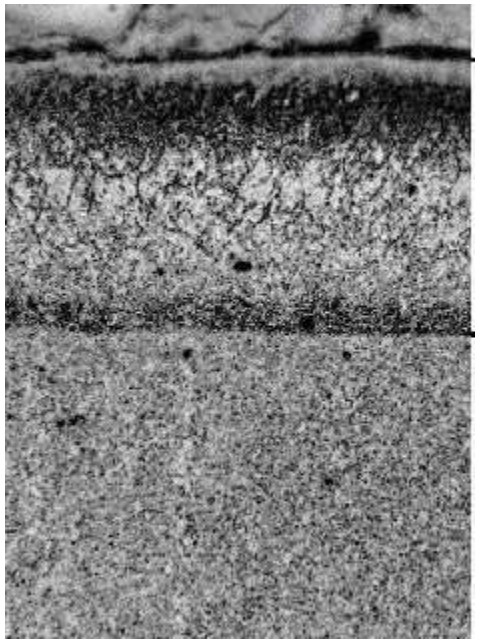
Современные технологии упрочнения поверхности деталей

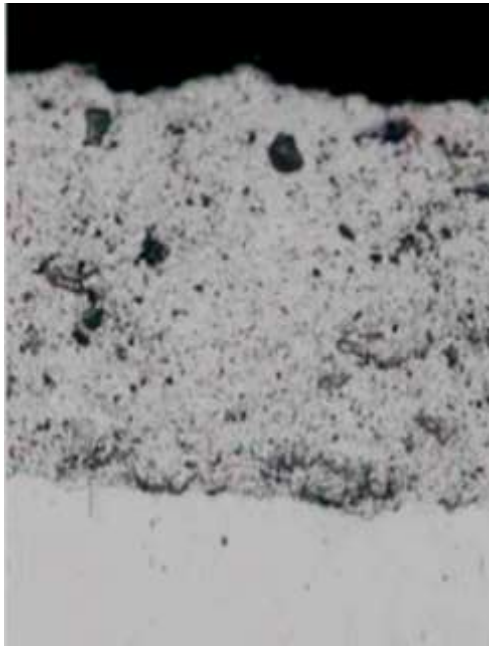
Модифицирование структуры поверхностного слоя детали

Нанесение пленок, покрытий и защитных слоев на деталях

Комбинированные методы

Особенности строения упрочненного поверхностного слоя



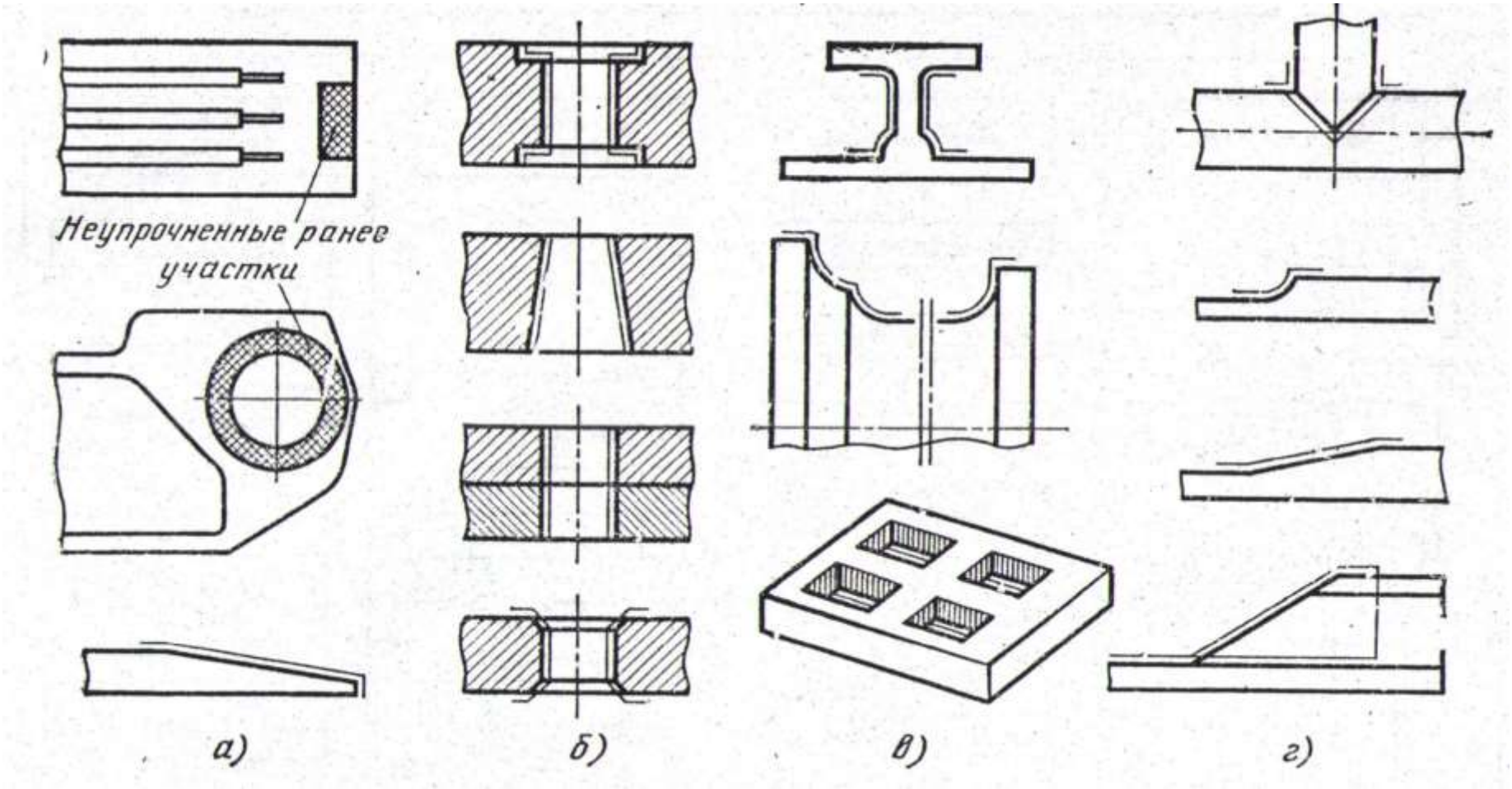


В случае модифицирования не происходит изменения геометрических размеров изделия. Упрочнение поверхностного слоя происходит за счет структурно-фазовых превращений в самом поверхности.

Нанесения пленок, покрытий и защитных слоев изменяет геометрический размер детали. Упрочнение обусловлено образованием на поверхности слоя материала с особыми свойствами.

Типы поверхности, подвергаемые местному упрочнению:

а – плоскости, б – отверстия, в – сложные поверхности,
г - сопряжения поверхностей

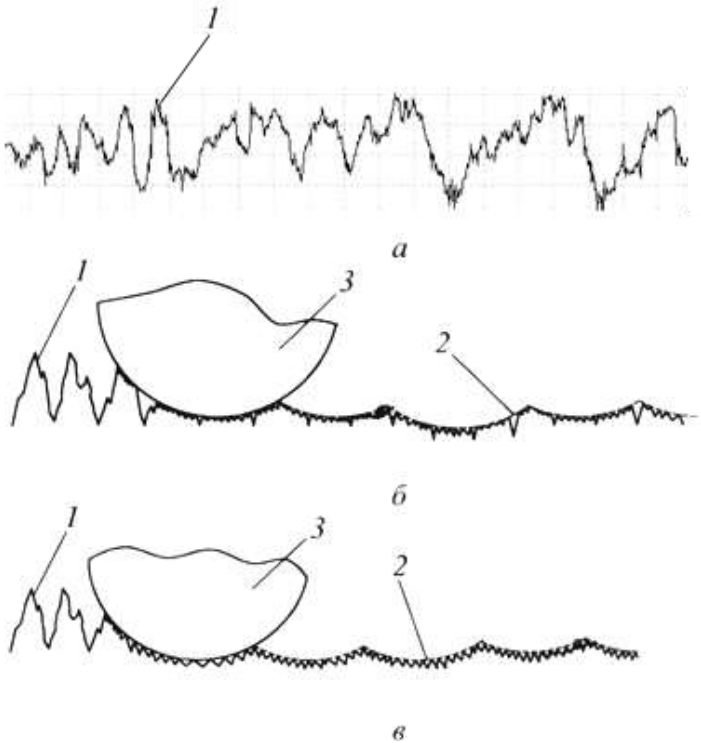


Модифицирование структуры поверхностного слоя детали

1. На этапе формообразующих операций	Литье, резание, обработка давлением.
2. Поверхностное пластическое деформирование (ППД)	Статическое, ударное, комбинированное
3. Поверхностная термическая обработка	Индукционная поверхностная закалка, обработка высококонцентрированными потоками энергии
4. Химико-термическая обработка (ХТО)	Поверхностное легирование неметаллами или металлами (диффузионная металлизация)
5. Ионная имплантация	Модификация или легирование поверхностных слоев
6. Формирование композиционных структур	Шаржирование, динамическое легирование
7. Комбинированные методы модифицирования	

Поверхностное пластическое деформирование

ППД - процесс упрочнения за счет подвода в зону обработки поверхности детали механической энергии, сопровождающийся наклепом и изменением микрорельефа поверхности за счет пластического деформирования.



Состояние поверхности детали после точения (а) и ППД в режиме ОУО (б) и УО (в).
1 – поверхность после точения,
2 – поверхность после ППД,
3 –деформирующее тело.

Режим отделочно-упрочняющей обработки – ОУО – частичное сглаживание неровностей поверхности. Повышает износостойкость при жидкостном и граничном трении, контактную жесткость при первом нагружении, прочность посадок, частично усталостную прочность.

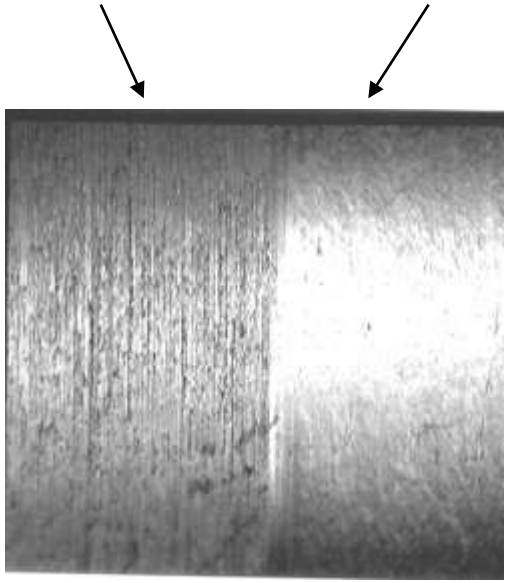
Режим упрочняющей обработки – УО – полные сглаживание исходной шероховатости и формирование нового профиля. Повышает износостойкость при сухом трении, усталостную прочность.

Суслова А.Г. Инженерия поверхности деталей М.: Машиностроение, 2008.

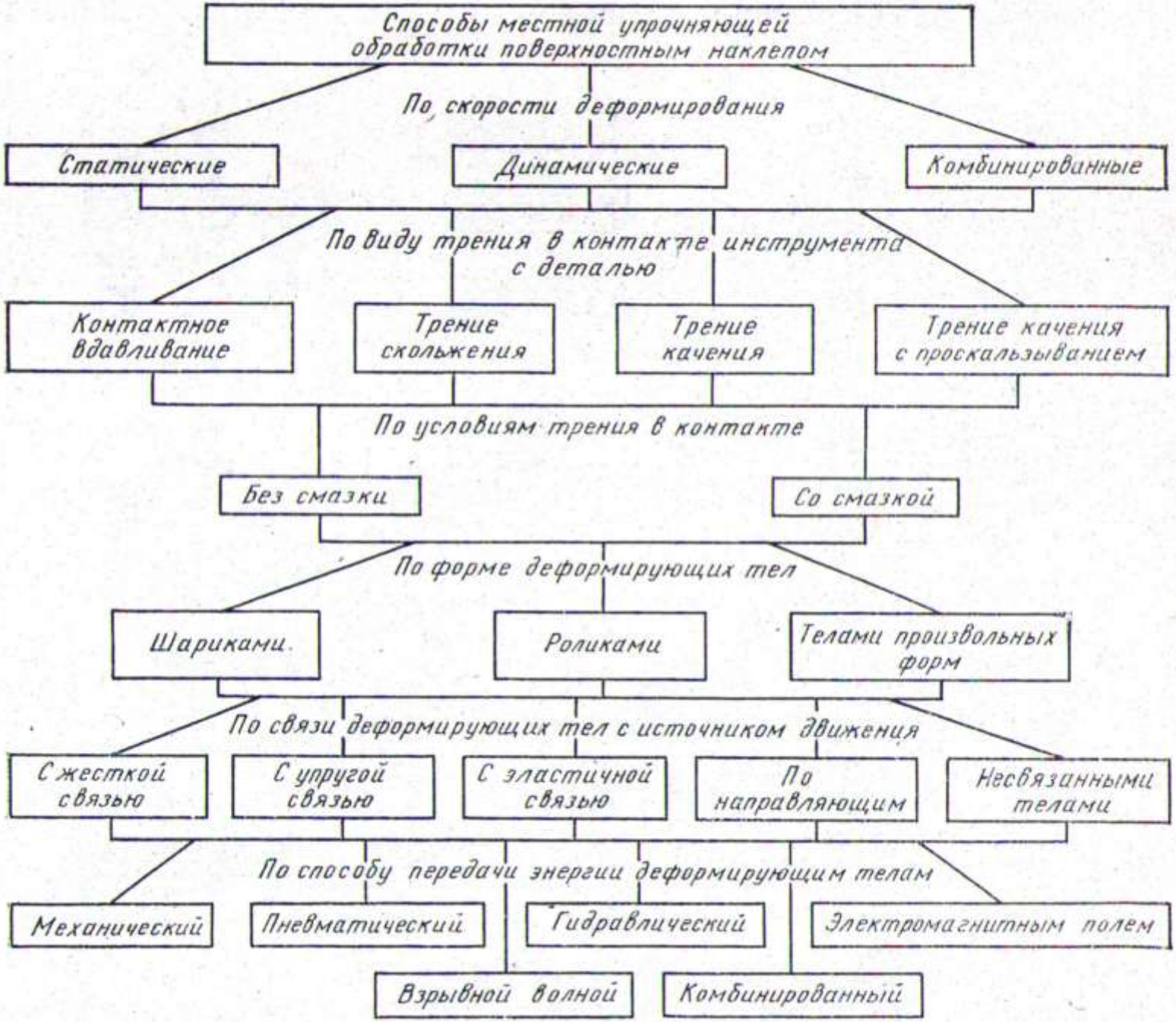
Главные отличия ППД от операций резания:

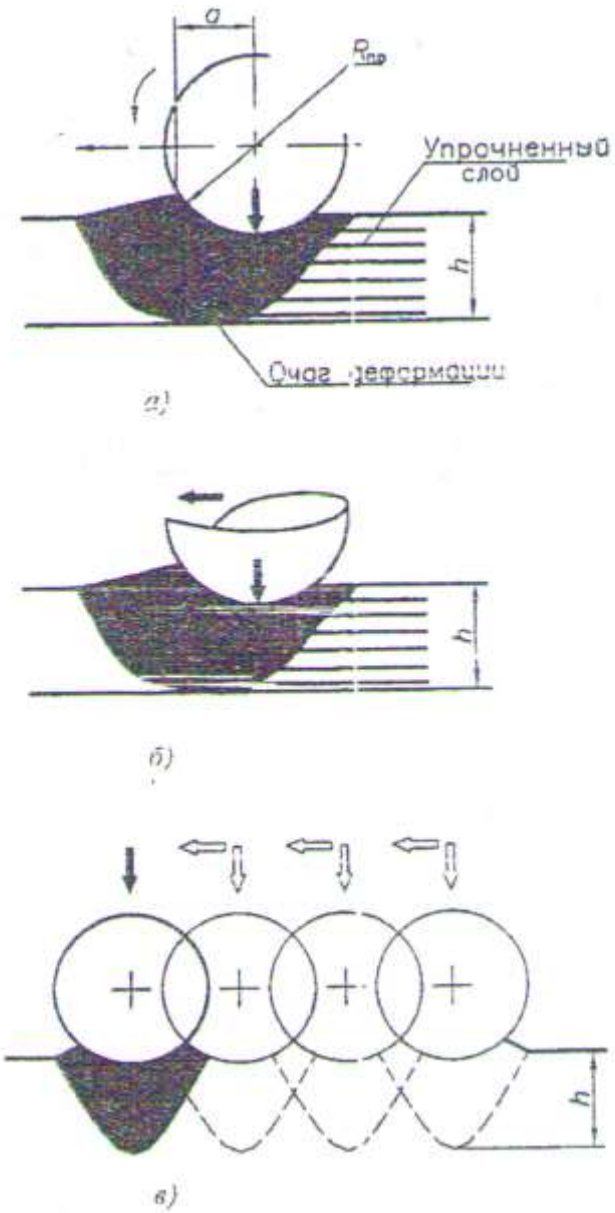
Поверхность после точения

Поверхность после выглаживания



1. Сохраняется целость волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое;
2. Отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;
3. Отсутствуют термические дефекты;
4. Снижается шероховатость поверхности в несколько раз за один рабочий ход;
5. Создается благоприятная форма микронеровностей с большей долей опорной площади;
6. Можно образовывать регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задержания смазочного материала;
7. Создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое.
8. Плавно и стабильно повышается микротвердость поверхности.


Способы местной упрочняющей обработки поверхностным наклепом
По скорости деформирования
Статические
Динамические
Комбинированные
По виду трения в контакте инструмента с деталью
Контактное вдавливание
Трение скольжения
Трение качения
Трение качения с проскальзыванием
По условиям трения в контакте
Без смазки
Со смазкой
По форме деформирующих тел
Шариками
Роликами
Телами произвольных форм
По связи деформирующих тел с источником движения
С жесткой связью
С упругой связью
С эластичной связью
По направляющим
Несвязанными телами
По способу передачи энергии деформирующим телам
Механический
Пневматический
Гидравлический
Электромагнитным полем
Взрывной волной
Комбинированный



Основные схемы взаимодействия деформирующего тела с обрабатываемой поверхностью

а. кочение – деформируемое тело прижимается к поверхности детали с фиксированной силой Р и перемещается с вращением.

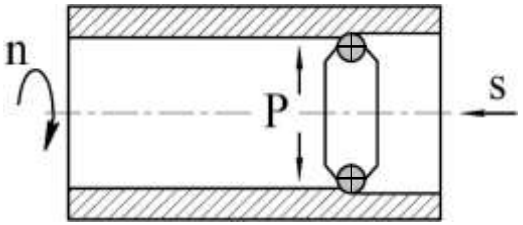
б. скольжение – деформируемое тело прижимается к поверхности детали с фиксированной силой Р и перемещается без вращения.

в. внедрение – деформируемое тело или тела наносит многочисленные удары перпендикулярно или под углом к поверхности

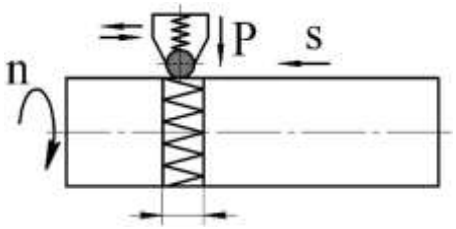
Кочение и скольжение относятся к **статическим методам ППД.**
Внедрение относится к **динамическим методам ППД.**

Некоторые методы ППД

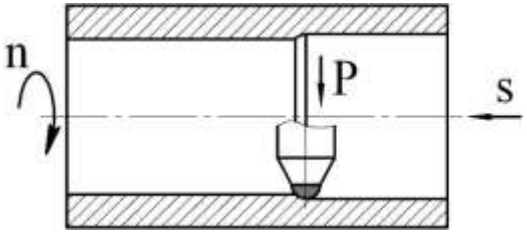
Статические



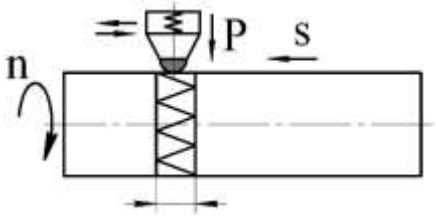
Упрочняющее обкатывание (раскатывание) роликами (шариками)



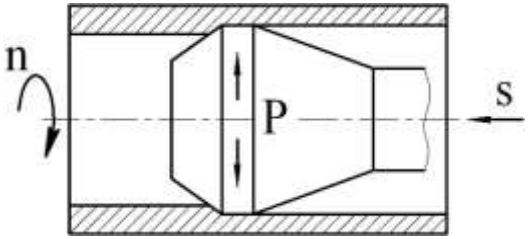
Вибрационное накатывание



Выглаживание внешних и внутренних поверхностей



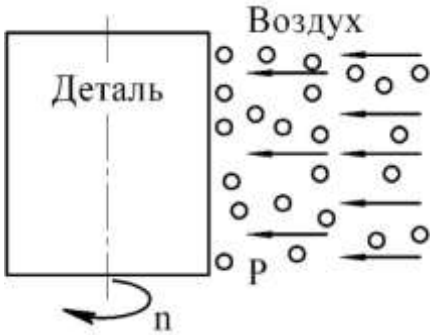
Вибрационное выглаживание



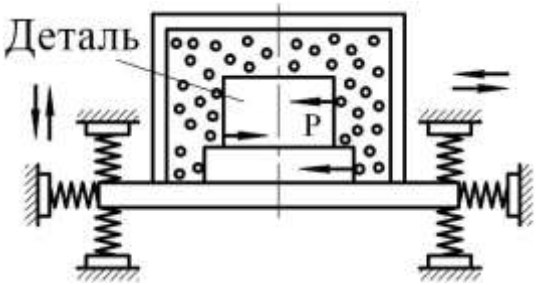
Дорнование

Некоторые методы ППД

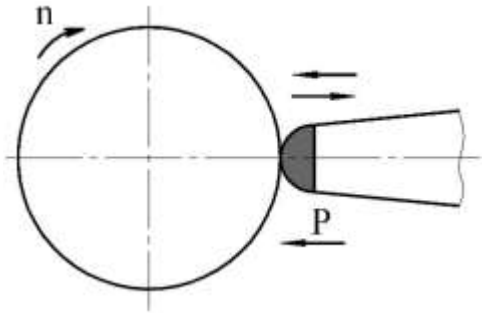
Динамические



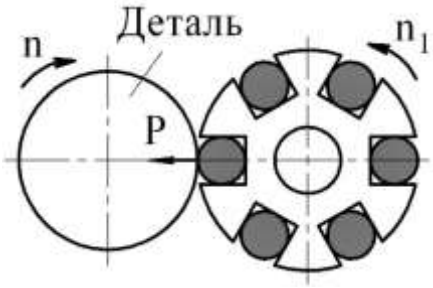
Дробеструйная обработка



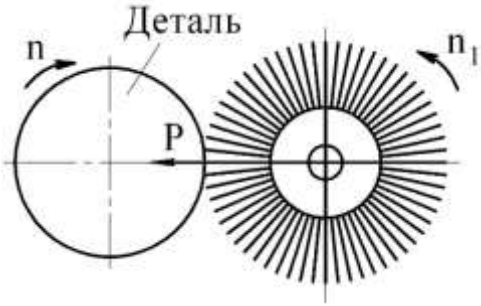
Вибрационная ударная обработка



Чеканка



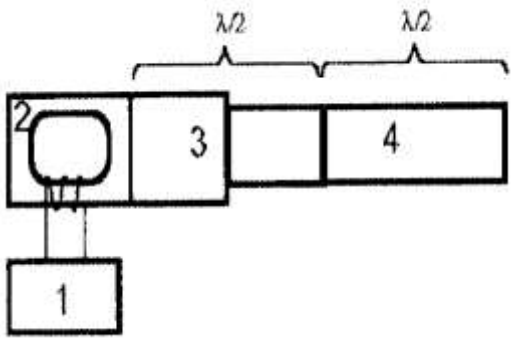
Центробежная обработка



Обработка механической щеткой

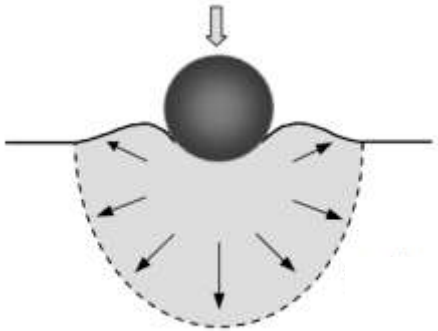
Поверхностная ультразвуковая обработка

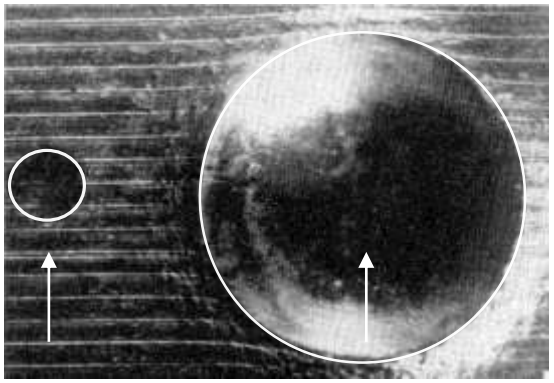
Принцип работы - одновременное действие квазистатических и высокочастотных динамических нагрузок на инструмент, создающее особые условия обработки материала.



Схемы возбуждения ультразвуковых колебаний в образце:

1 – генератор;
2 – магнитострикторъ;
3 – концентратор;
4 – обрабатываемый образец.



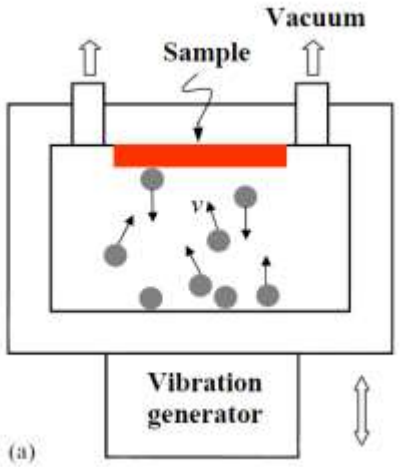


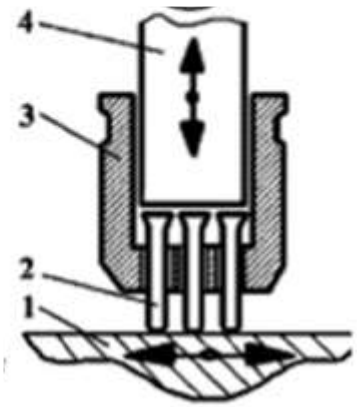
Отпечаток Бринеля **Отпечаток Бринеля с УЗ**

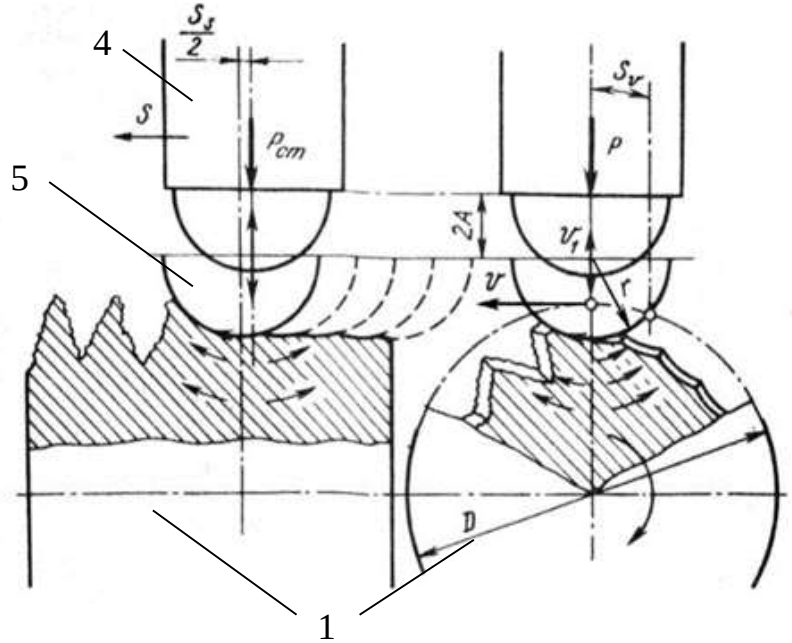
Механизм воздействия на материал:

1. Объемная диссипация акустической энергии приводит к увеличению пластичности в очаге деформации
2. Граничная диссипация акустической энергии приводит к существенному уменьшению трения

Схемы ППД с одновременным воздействием ультразвуковых колебаний







а б : в

а – обработка свободными деформирующими элементами;

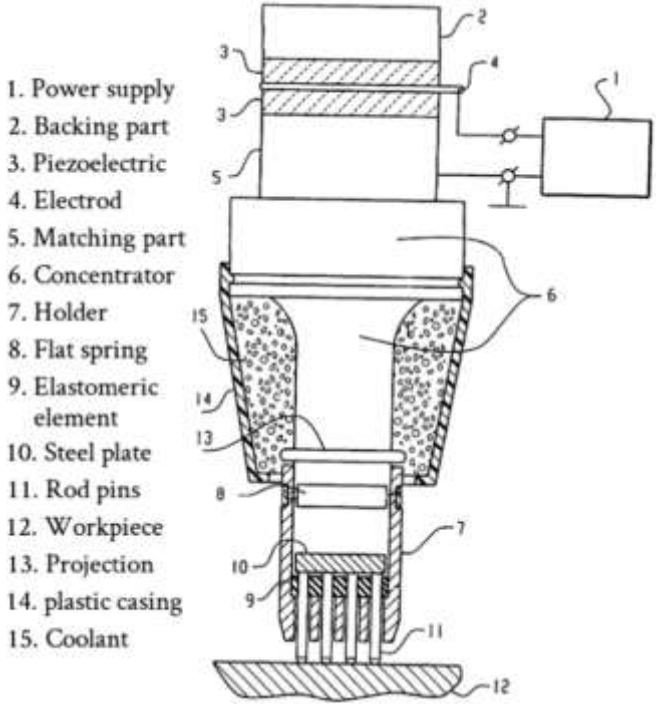
б – обработка многоэлементным инструментом;

в – обработка ультразвуковым инструментом.

1 – обрабатываемый образец; – генератор; 2 – бойки; магнитострикторы; 3 – корпус; 4 – концентратор; 5 – индентор; 6 –7 – свободно деформирующие элементы (шарики).

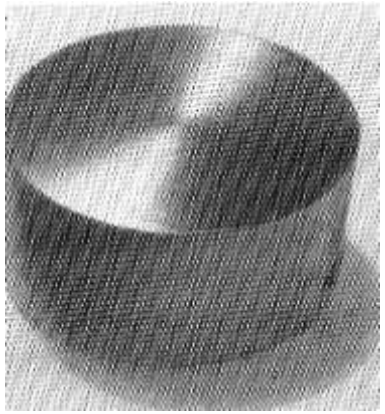
Главное техническое преимущество – снижение силового воздействия инструмента на поверхность детали

Ультразвуковая ударная обработка (УУО) многоэлементным инструментом

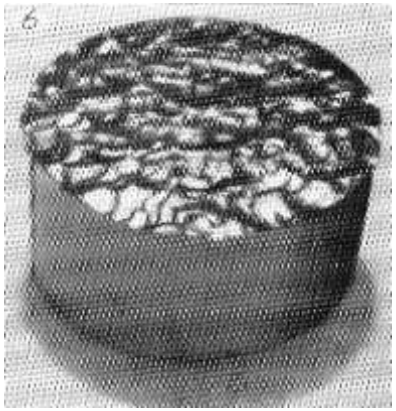


Наименование показателя	Единица измерения	Номинальное значение
Максимальная потребляемая электрическая мощность	Вт	570
Напряжение питания	В	220
Частота питающего напряжения	Гц	50
Диапазон рабочих частот	кГц	26 — 28
Диапазон токов поляризации	А	2 — 6
Диапазон выходной электрической мощности	Вт	0 — 400

Ультразвуковая ударная обработка многоэлементным инструментом



а



б

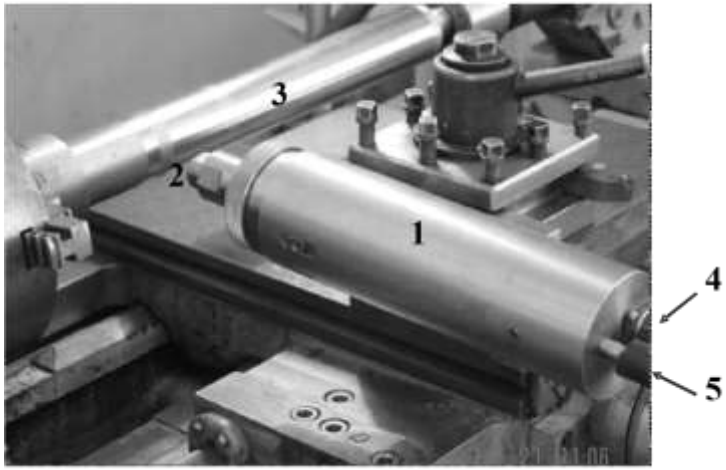
в

г

Состояние поверхности до (а, в) и после УУО (б, г):

а, б –плоской поверхности стали; в, г – сварного шва

Ультразвуковая обработка (УЗО)



Размещение устройства УФО на токарном станке:
1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – индентор; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – соединительный кабель; 5 – система охлаждения воздухом

Ультразвуковой комплект

Технические характеристики генератора

Напряжение питания	220 В
Частота питающего напряжения	50 Гц
Потребляемая мощность	0,3 кВт
Выходное напряжение	100 В
Частота выходного напряжения	22 кГц
Выходная мощность	50…250 Вт

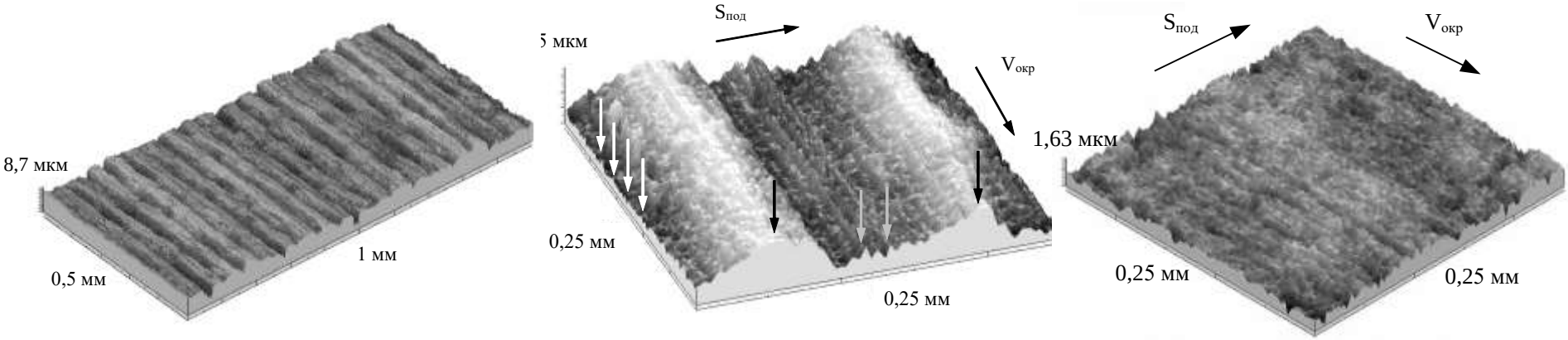
Технические характеристики инструмента

Рабочая частота	22 кГц
Индентор	шарик d = 5 мм из сплава ВК8
Амплитуда колебаний	5…20 мкм
Статическое усилие прижима	70…75 Н

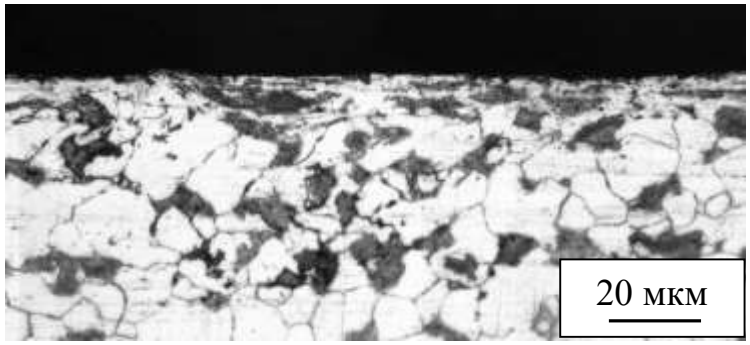
Технические достоинства

- **Снижение силового воздействия инструмента на поверхность детали**
- **Точный контроль процесса, что придает ему повторяемость и надежность**
- **Возможность управления топографией поверхности**

Ультразвуковая обработка (УЗО)

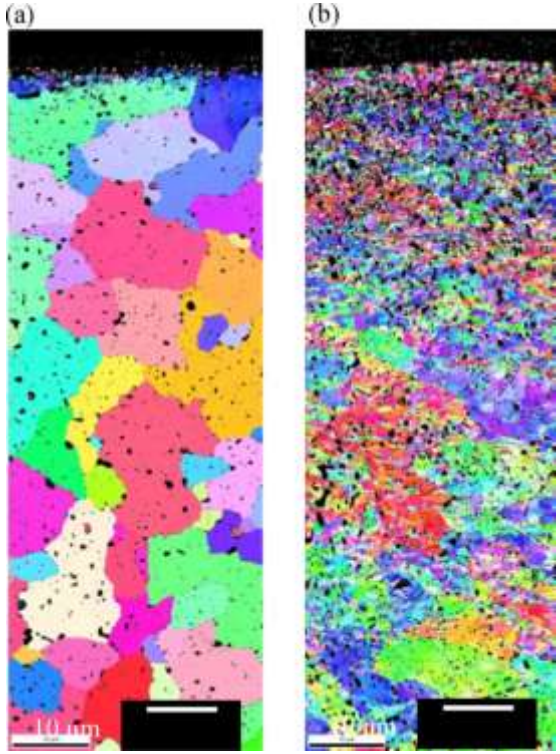


Состояние поверхности конструкционной стали после УЗО
в режиме отделочно-упрочняющей обработки (а) и упрочняющей обработки с формированием анизотропной (б) и изотропной (в) топографии



Микроструктура поверхности конструкционной стали после УЗО

Наноструктурирование поверхностного слоя материала после ультразвуковой обработки поверхности



Изображение сечения материала, полученное методом дифракции отраженных электронов в обычном состоянии (а) и после УЗО (б)

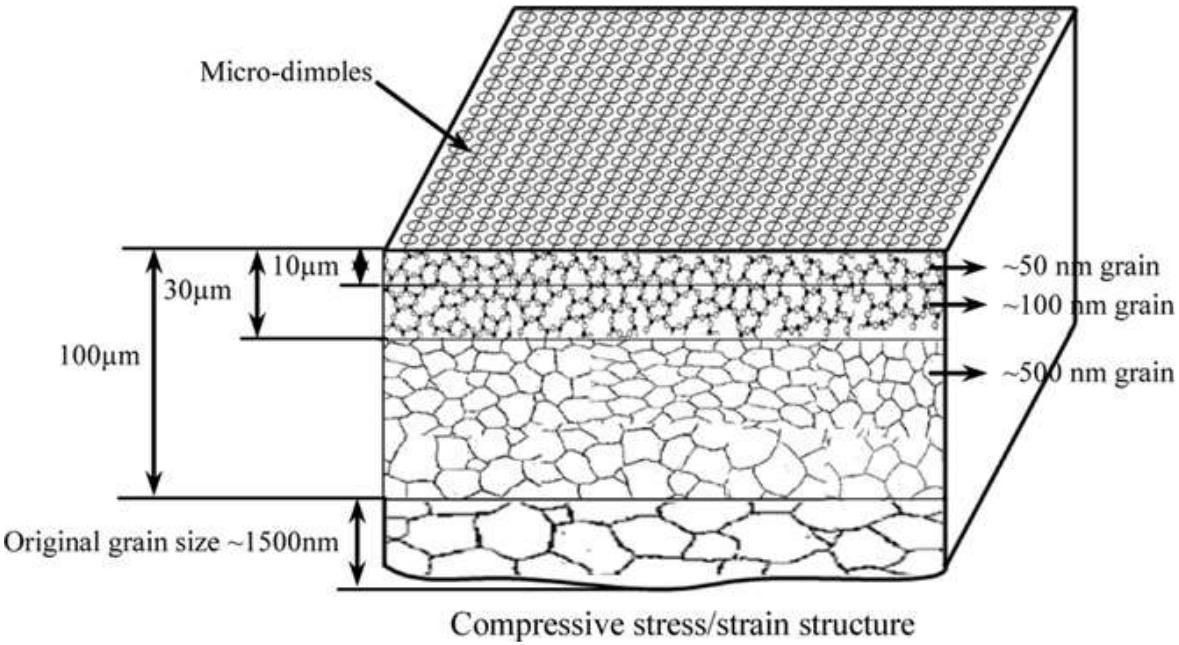
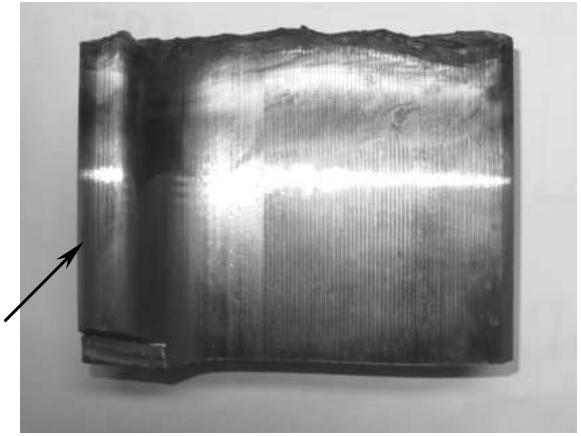


Схема структуры в сечении материала, после УЗО

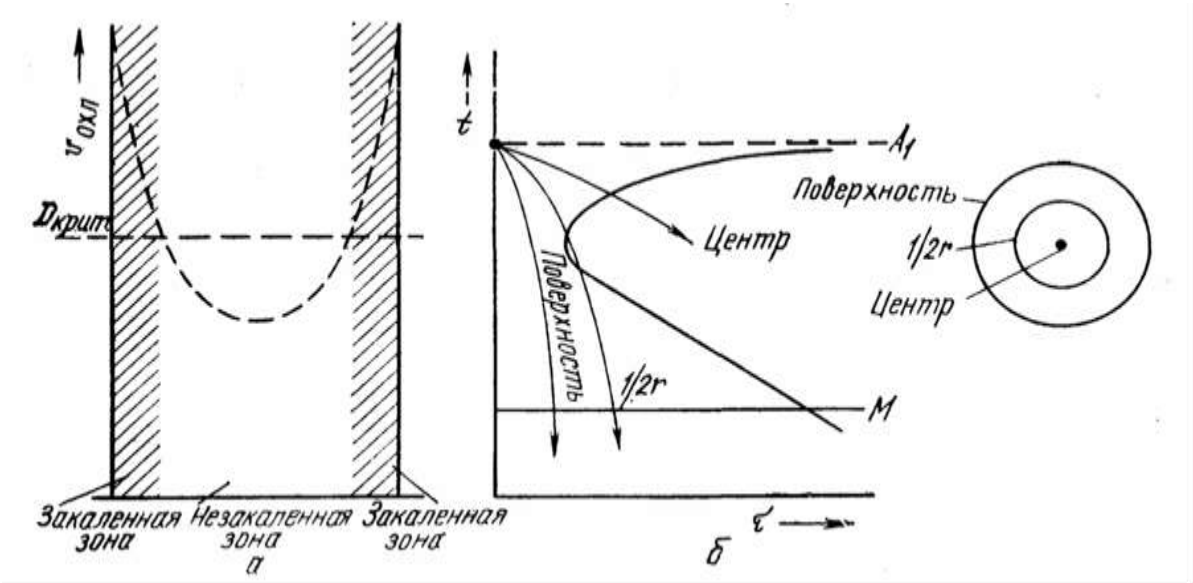
Общий вид комплекса для ультразвуковой обработки бандажей локомотивных колес



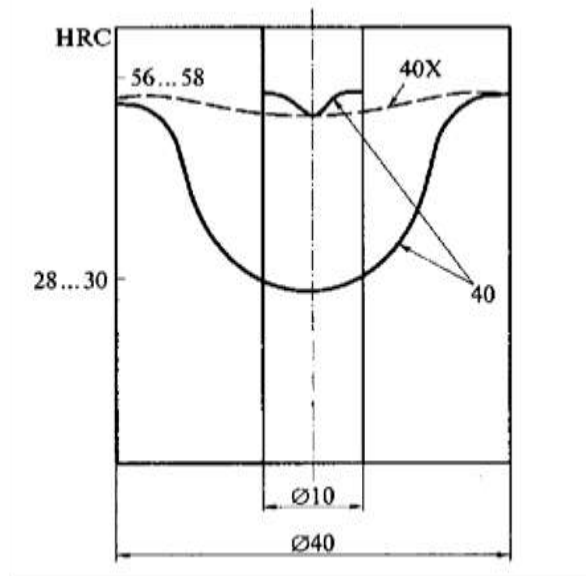
Внешний вид сегмента бандажа колесной пары локомотива после ультразвуковой обработки

Поверхностная термическая обработка

Прокаливаемость стали

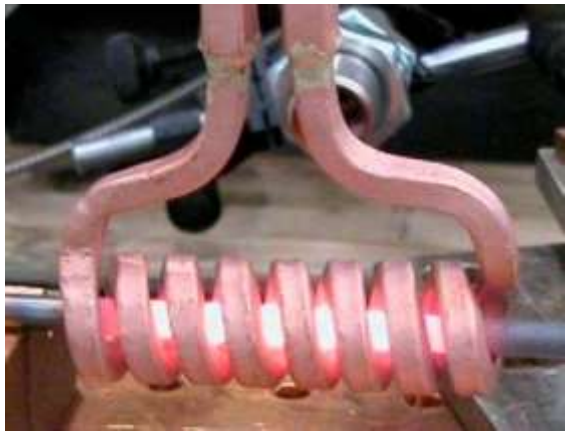


Схема, показывающая влияние скорость охлаждения по сечению образца на прокаливаемость



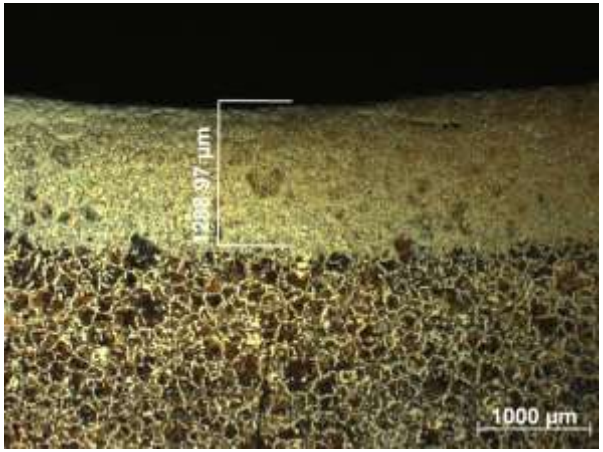
Твердость по сечению сталей 40 и 40Х после закалки

Поверхностная закалка стали токами высокой частоты



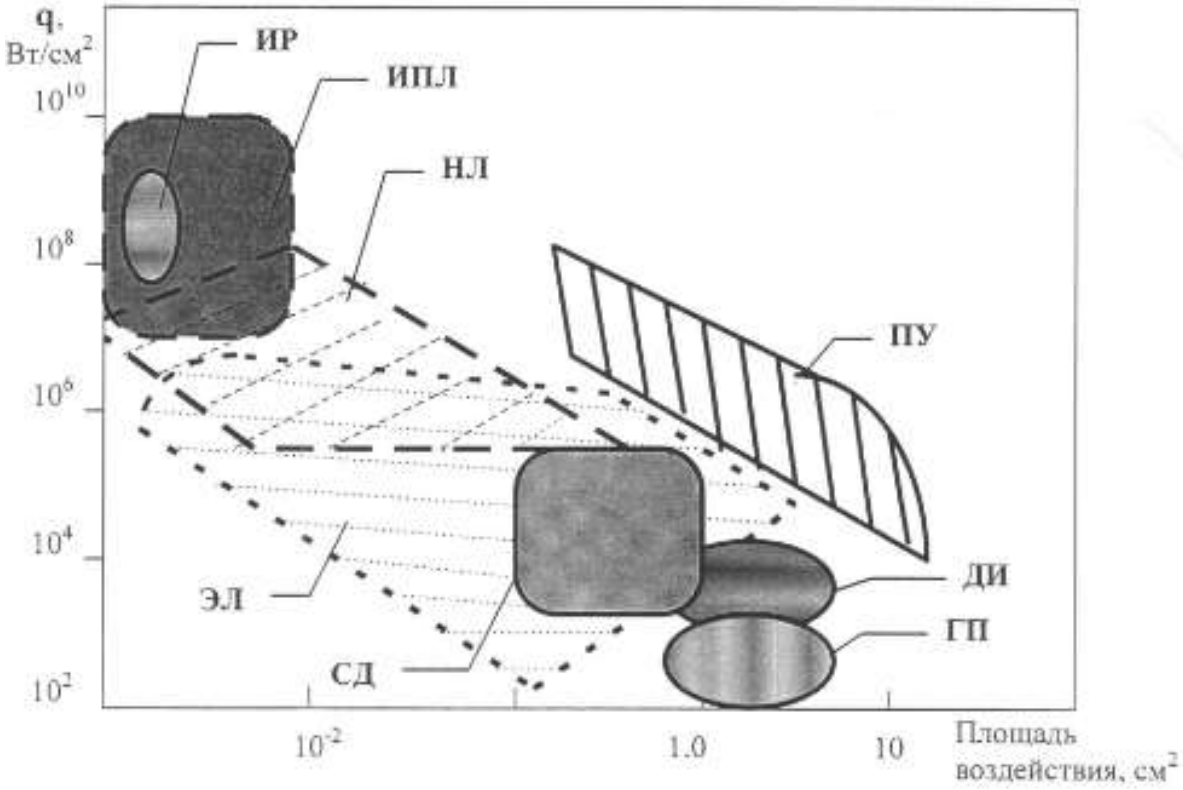
Нагрев детали в индукторе

Стали подвергаемые поверхностной закалки 40, 45, 40Х, 45Х, 40ХН и др



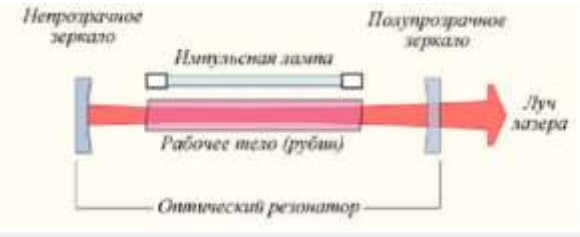
Микроструктура полученная при поверхностной закалке

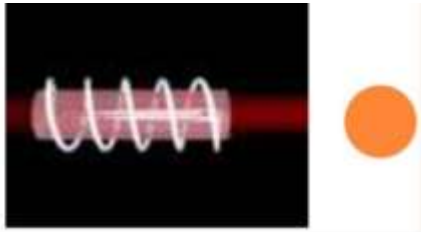
Обработка высококонцентрированными потоками энергии

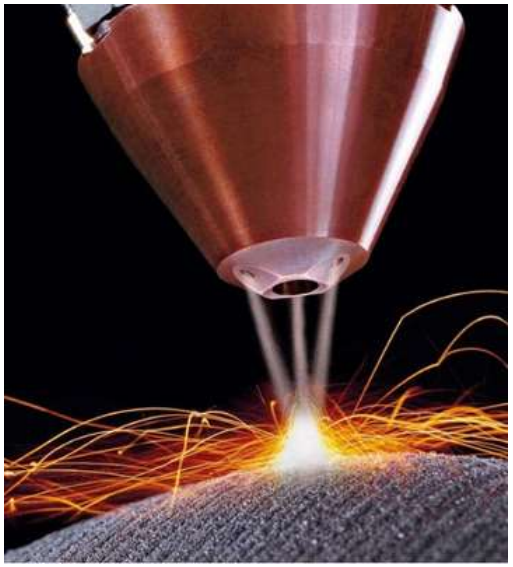


Соотношение эффективной площади воздействия и удельной мощности различных источников энергии: ГП – газовое пламя; ДИ – электро-дуговой источник; СД – сварочная дуга; ЭЛ – электронный луч; ПУ – плазменный ускоритель; НЛ – непрерывный лазерный луч; ИПЛ – импульсно-периодический лазерный луч; ИР – электроискровой разряд.

Поверхностная лазерная обработка

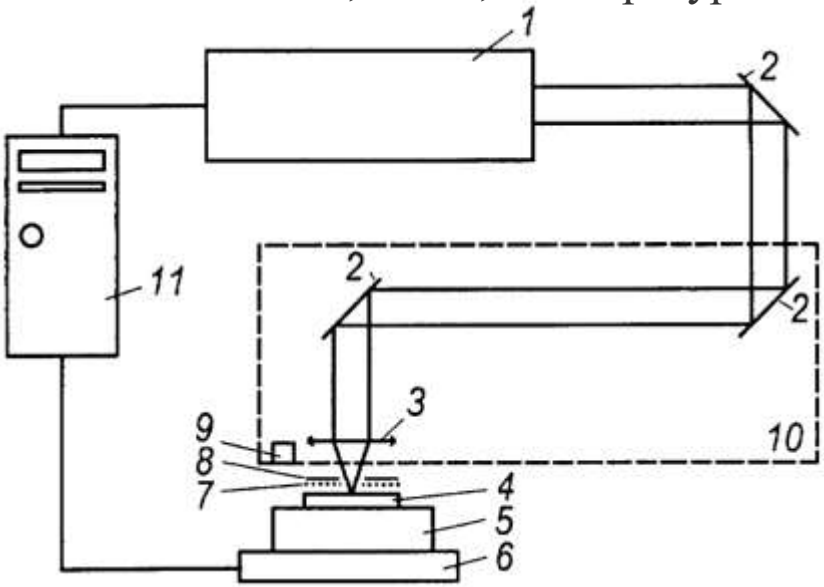






Устройство лазера

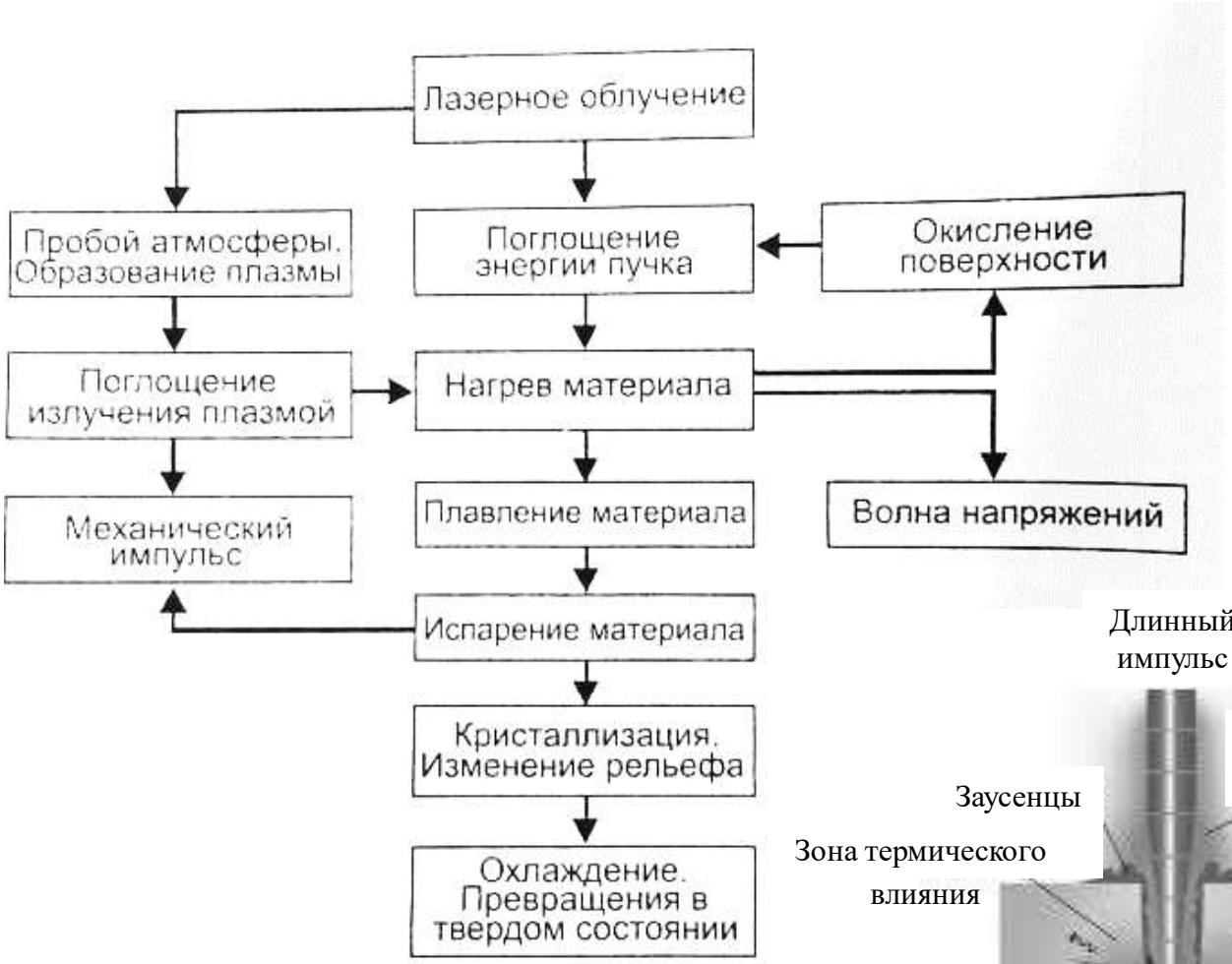
Лазер – источник монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча и большой концентрацией энергии. Диаметр луча составляет 0,01 мм, температура – 6000-8000°С.



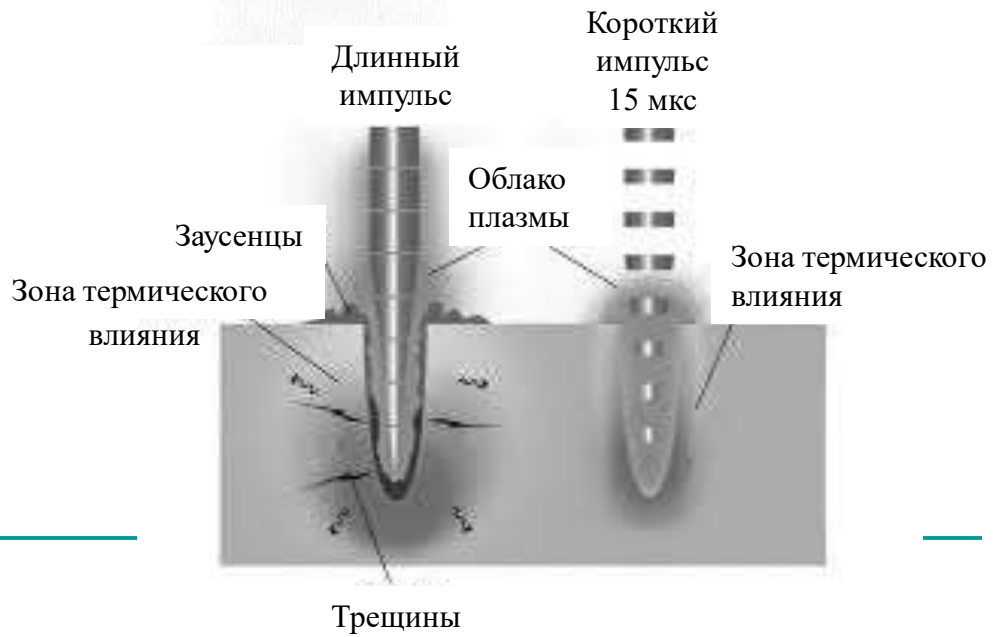
Установка для лазерной обработки поверхности деталей:

1 – CO_2-лазер, 2 – система зеркал, 3 – линза фокусирующая лазерный луч, 4 – изделие, 5 и 6 – столик с манипулятором, 7 и 8 – дополнительный экран с диафрагмой, 9 – система охлаждения, 10 – летающая оптика, 11 – компьютер.

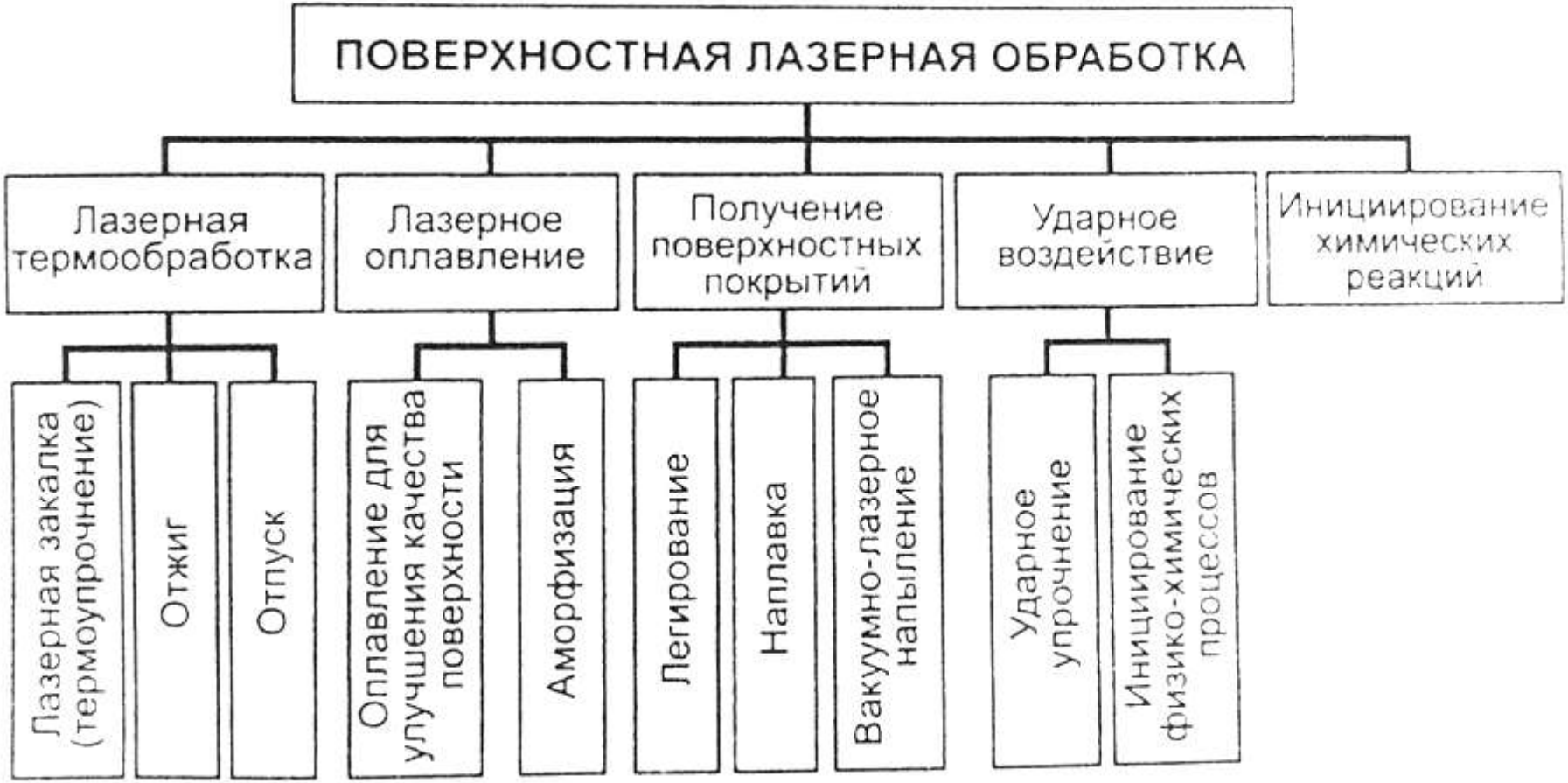
Взаимодействие лазерного луча и материала



При обработке используется термическое действие света, вызываемое поглощением энергии **лазера** в обрабатываемом материале.



Классификация методов лазерной поверхностной обработки по технологическим принципам



Лазерная закалка

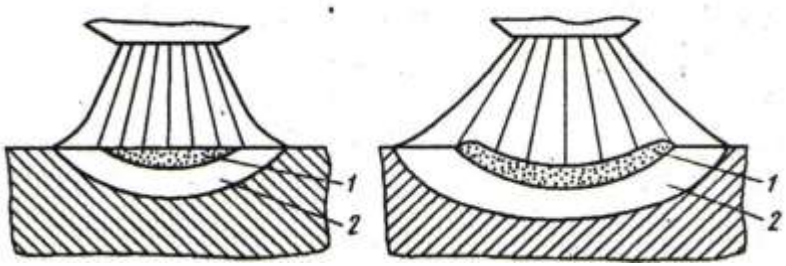


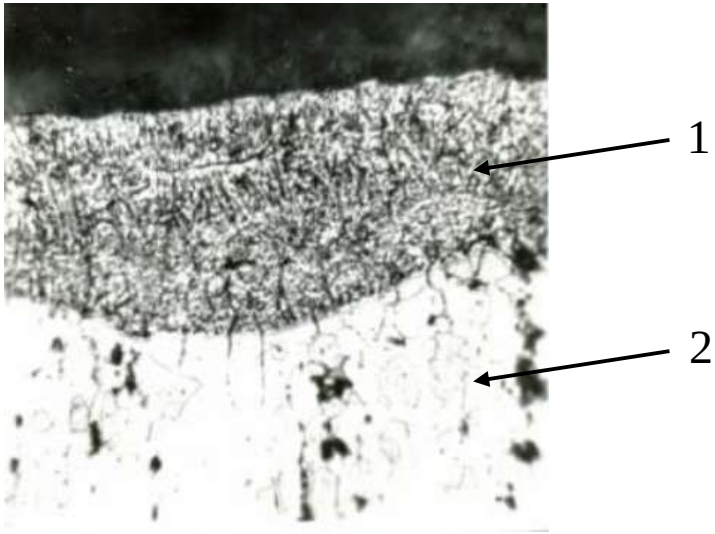
Схема поверхностного воздействия лазера на металл при закалке из твердой фазы (а) и закалке из жидкого состояния (б):
1 – зона закалки; 2 – зона термического влияния.

Лазерный отпуск

Лазерный отпуск применяется при необходимости локального увеличения пластичности или ударной вязкости, например, в местах крепления различных деталей.

Лазерный отпуск проводится только в режиме без оплавления поверхности.

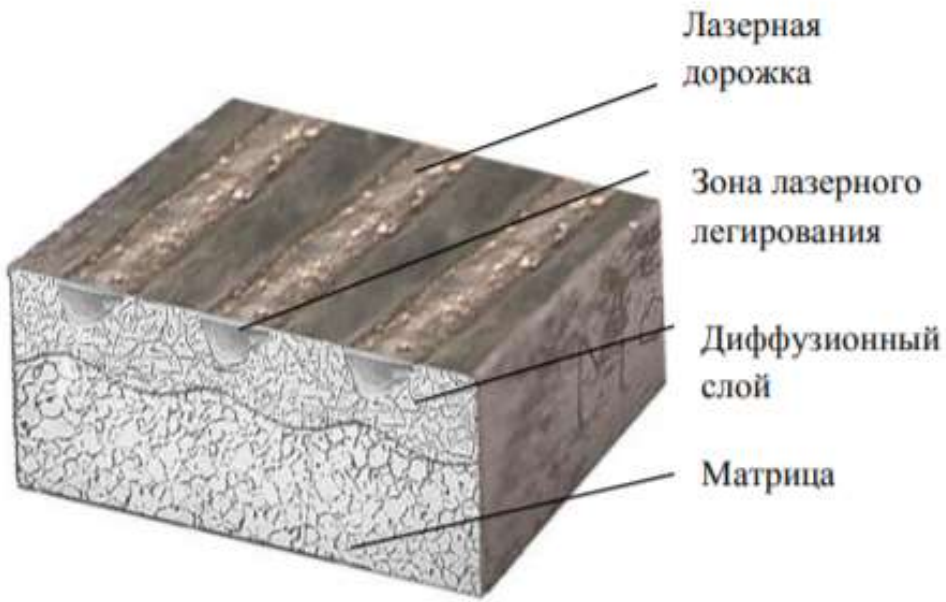
Сталь после лазерного отпуска имеет большую прочность, твердость, ударную вязкость, чем после традиционной технологии отпуска.



Структура поверхностного слоя стали 20 после лазерной закалки и отпуска.

Комбинированная поверхностная обработка, включающая лазерное воздействие

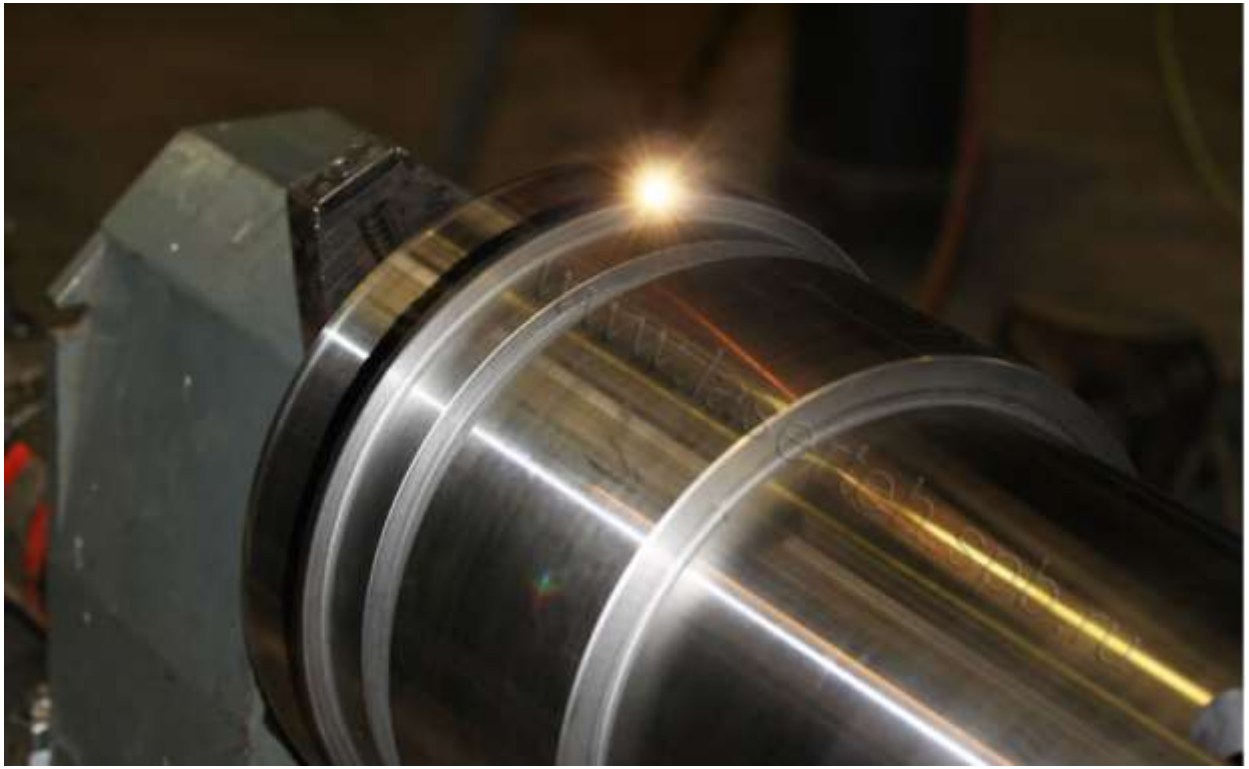
Лазерное легирование относится к процессам создания на поверхности обрабатываемого материала покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками.



Формирование модифицированного слоя на поверхности стали.

Термообработка **буровых труб** из стали 30ХМ комплексом оборудования на базе волоконного лазера ИРЭ – ПОЛЮС мощностью 5 кВт.

HRC основы — 26…28;
HRC закаленного слоя — 52…54;
глубина слоя — 0,5 мм; ширина дорожки — 2 мм.



Преимущества поверхностной лазерной обработки:

– возможность обработки в труднодоступных местах;

– минимальный нагрев детали;

– отсутствие коробления;

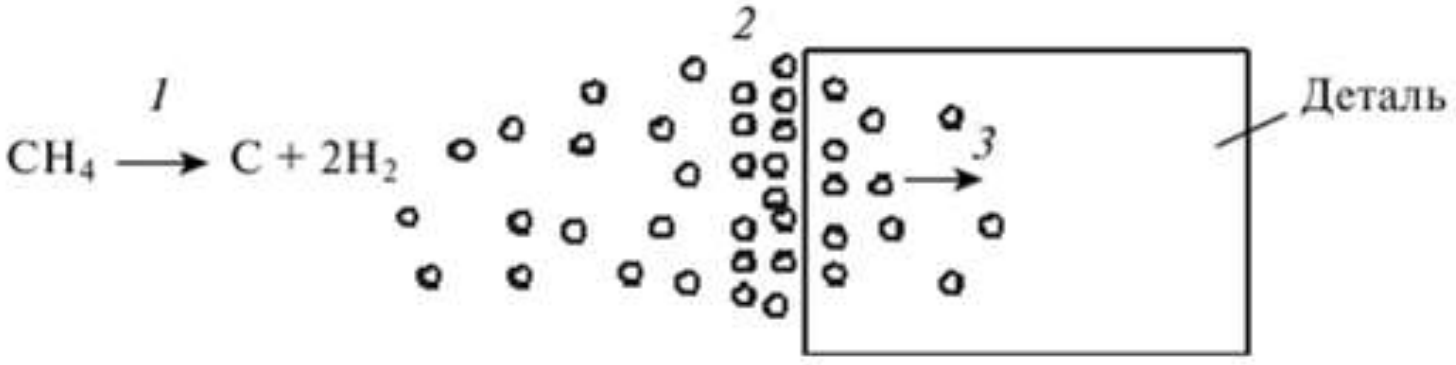
– осуществление процесса без подогрева детали;

– обработку отдельных участков можно проводить и после сборки конструкции или узла.

Химико-термическая обработка

Основные взаимосвязанные стадии ХТО:

1. Диссоциация активных атомов в насыщающей среде и диффузия их к поверхности обрабатываемого металла;
2. Адсорбция образовавшихся активных атомов поверхностью насыщения;
3. Диффузия – перемещение адсорбционных атомов внутри металла.



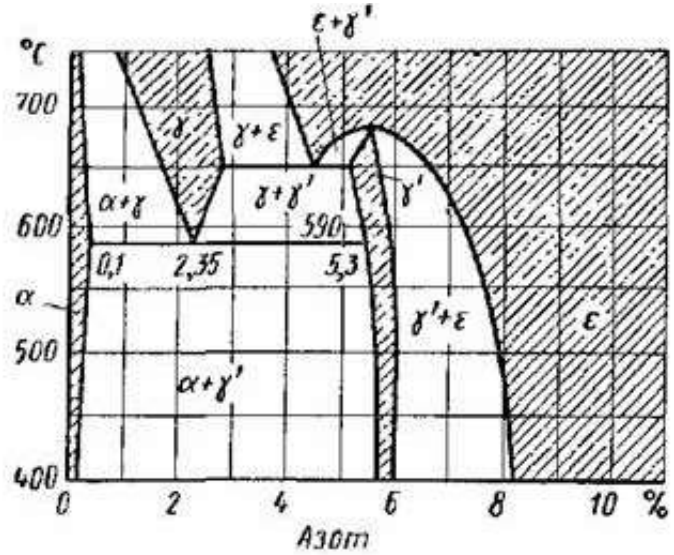
Все процессы ХТО являются термически активируемыми, т.е. скорость процессов растет с увеличением температуры.
В результате диффузии образуется диффузионный слой, отличающийся от исходного металла по химическому составу, структуре и свойствам.

Диссоциация - получение насыщающего элемента в активном атомарном состоянии. ***Адсорбция*** - поглощение поверхностью металла свободных атомов. ***Диффузия*** - проникновение насыщающего элемента вглубь.

Классификация способов химико-термической обработки

- ХТО
  - ДИФФУЗИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ НЕМЕТАЛЛАМИ
    - Однокомпонентное диффузионное насыщение неметаллами
      - цементация
      - азотирование
      - борирование
      - силицирование
    - Многокомпонентное насыщение неметаллами
      - нитроцементация (азотонауглероживание)
      - цианирование (азотонауглероживание)
      - сульфоазотирование
      - боросилицирование
  - ДИФФУЗИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ МЕТАЛЛАМИ
    - Однокомпонентное насыщение металлами
      - алитирование (алюминирование)
      - хромирование
      - цинкование
      - титанирование
      - беррилизация
      - насыщение другими металлами
    - Многокомпонентное насыщение металлами
      - насыщение алюминием совместно с другими металлами (Cr, Ti, Zn, V и др.)
      - насыщение хромом совместно с другими металлами (Al, Ti, Mn и др.)
  - МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ НАСЫЩЕНИЕ МЕТАЛЛАМИ И НЕМЕТАЛЛАМИ
    - насыщение бором совместно с металлами (Cr, Ti, W и др.)
    - насыщение кремнием совместно с металлами (Cr, Mo, W, Ti)
    - карбохромирование
    - хромоазотирование (хромонитридизация)

Азотирование

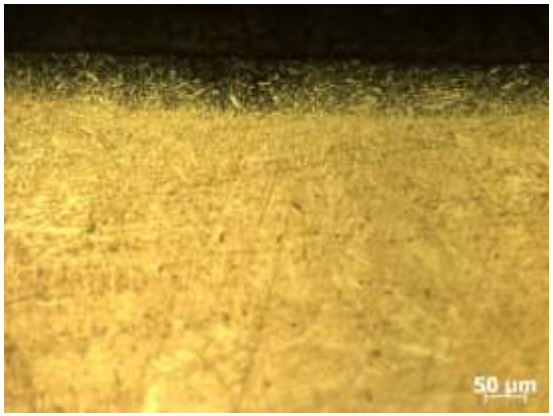


α - фаза – твердый раствор азота в α-железе;

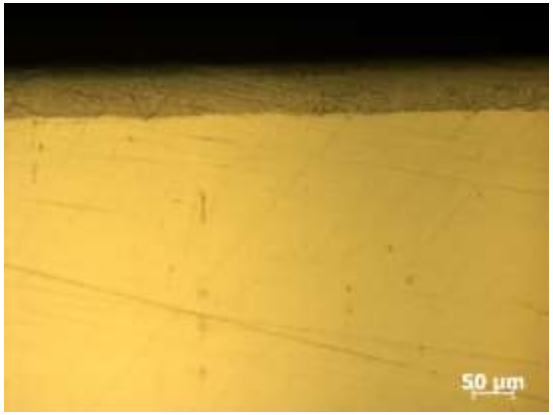
γ - фаза – азотистый аустенит, который образуется при температуре выше эвтектоидной (591°C);

γ′ - фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_4N (5,7 – 6,1% N);

ε - фаза – твердый раствор на основе нитрида $Fe_{2-3}N$ (8,0– 11,% N).



Азотируемые стали:
38ХМЮА,
35ХМЮА,
30ХТ2Н3Ю.



Азотированная сталь 20Х13

Азотированная сталь 12Х18Н10Т

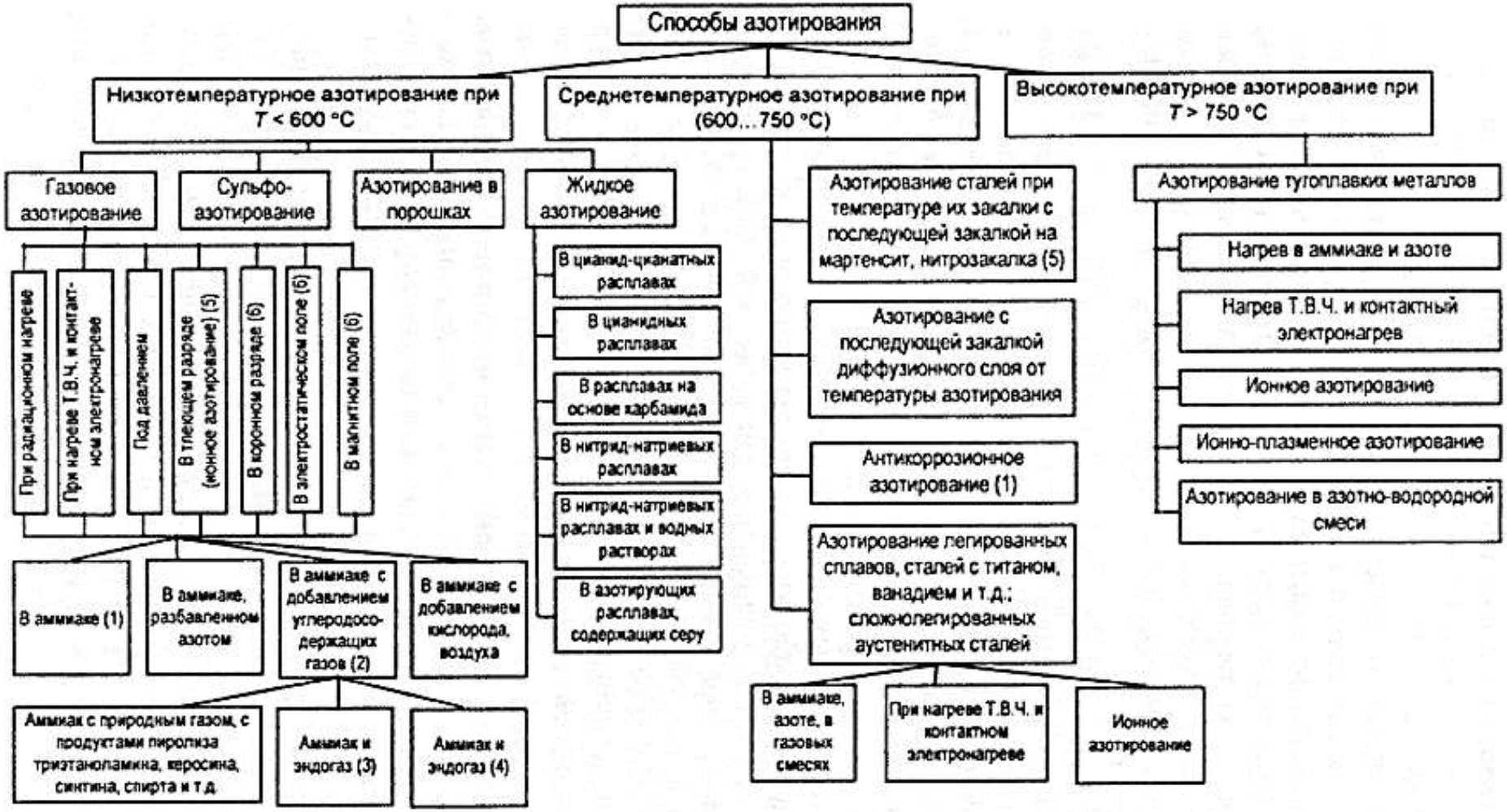


Рис. 1 Классификация способов азотирования:
(1) для углеродистых сталей рекомендуется закалка диффузионного слоя. Охлаждение с температуры азотирования в воде, масле, водовоздушной смеси; (2) низкотемпературная нитроцементация, углеродоазотирование; (3) никотрирование (nikotrieren, nitemper – процесс) (при радиационном нагреве); (4) нитрок (nitrok) (при радиационном нагреве); (5) «Марстрессинг»-процесс; (6) возможно азотирование в очищенном азоте; (7) в атмосфере продуктов пиролиза карбомида $(NH_2)_2CO$ и серы

Принцип ионно-плазменного азотирования

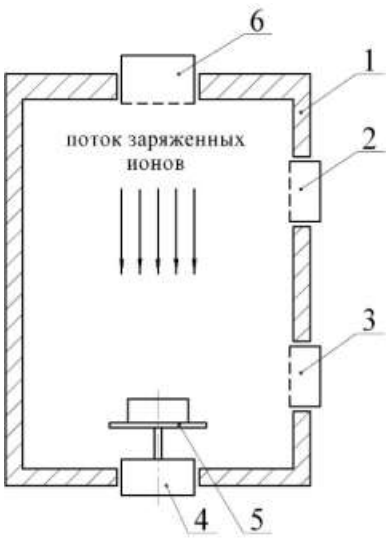


Схема азотирования:
1 – вакуумная камера;
2 – система подачи газа;
3 – вакуумная система;
4 – узел вращения;
5 – держатель с образцом;
6 – источник генерации заряженных частиц

В результате физико-химических реакций, протекающих на поверхности деталей, охваченных слоем ионизированного газа, активно образуются различные модификации диффузионных покрытий, состоящие из нитридов железа, хрома и др. элементов.

Внешний вид установки для ионно-плазменного азотирование

Генерация плазмы в тлеющем разряде и усовершенствованные методы

При **азотировании в тлеющем разряде**, процесс диффузионного насыщения осуществляется в азотсодержащей газовой среде при рабочем давлении в камере установки 0,4-10 мбар под воздействием импульсной плазмы (частота 10 кГц, напряжение 400-800 В), возникающей между катодом - деталью и анодом - стенками вакуумной камеры.

Для управления плотностью ионного тока в системах, где подложка с деталями выполняет функцию катода используют **схему полого катода**

Ионное азотирование обеспечивает требуемое качество и служебные свойства на любых сталях, сплавах и металлокерамике и предназначены для различных изделий и инструмента во всех отраслях промышленности.

Основные преимущества:

•экологическая чистота, безвредность и безотходность процессов;

•ресурсосбережение за счет резкого сокращения электроэнергии в 2-5 раз и рабочих газов в 100-200 раз;

•повышение производительности, снижение трудоёмкости и себестоимости в 2-4 раза.

Метод низкотемпературного интенсивного азотирования

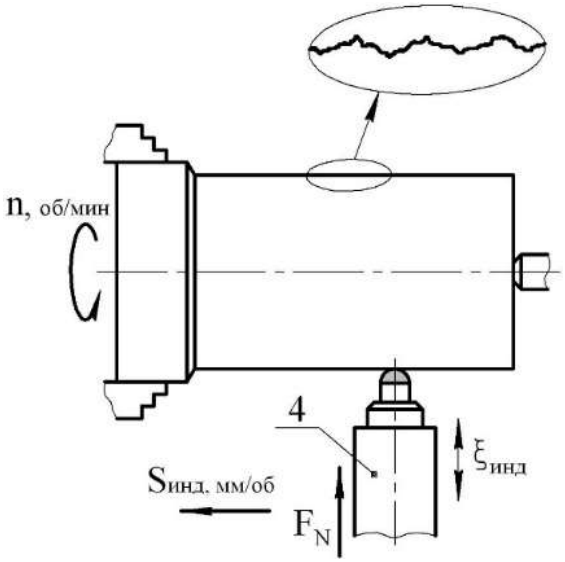
Установка разработана в Институте сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, РФ.

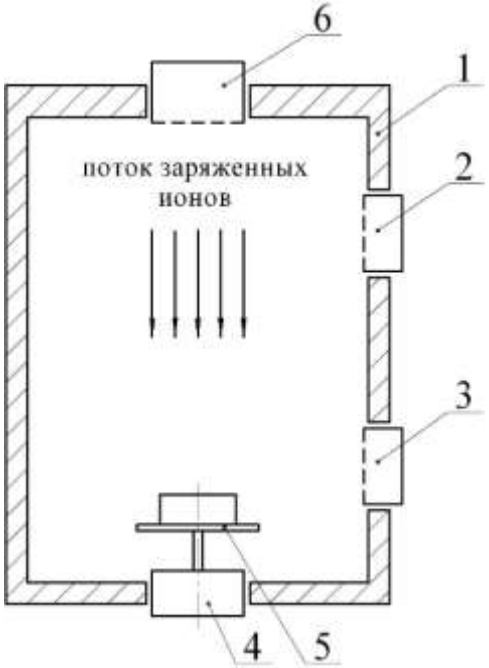
Азотирование в дуговом разряде низкого давления

Вакуумная ионно-плазменная установка с плазмогенератором ПИНК с подачей на азотируемое изделие отрицательного напряжения смещения.

Давление в камере	0,9 Па
Ток разряда	10 А
Напряжение горения разряда	40 В
Напряжение смещения на образцах	– 600 В
Температура процесса	200-500°С

Комбинированная упрочняющая обработка, включающая предварительную УФО поверхности стальной детали и последующее ионно-плазменное азотирование





Сталь 20Х13 и 40Х13

Температура азотирование

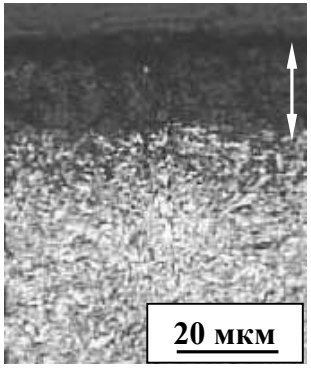
200, 350, 450, 500°С

Время азотирования

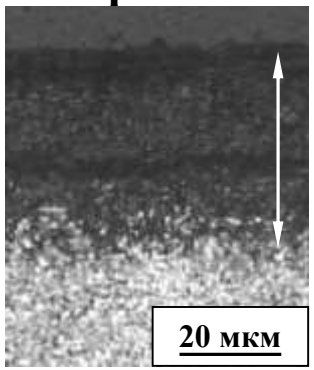
40 мин, 2, 4, 8 часов

Характеристики упрочненного слоя

Азотирование

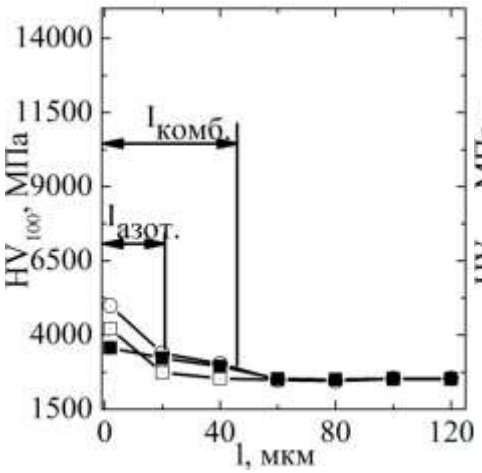


Комбинированная обработка

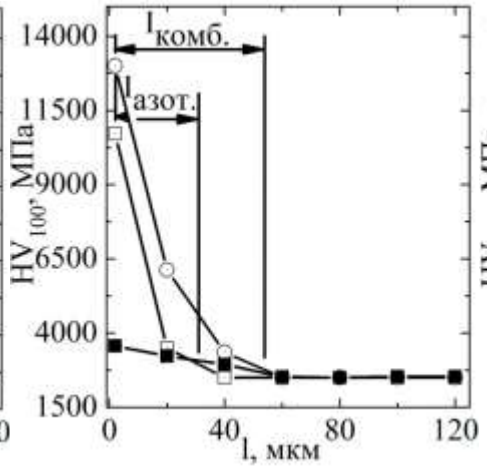


Микроструктура поверхностного слоя стали 40Х13 после азотировании при температуре 500ºС

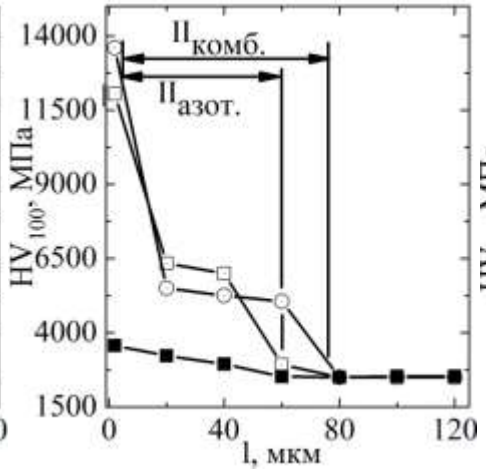
Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя



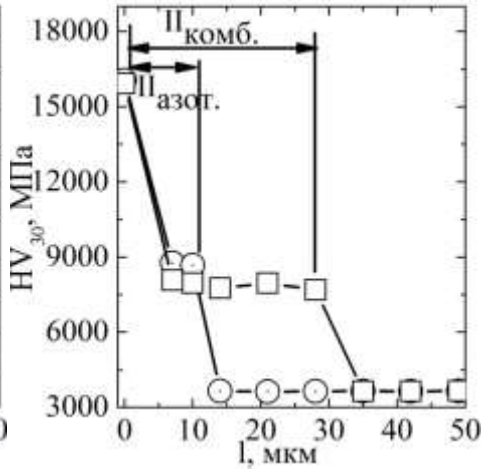
Сталь 20Х13
200ºС, 8 часов



Сталь 20Х13
350ºС, 4 часа



Сталь 20Х13
500ºС, 40 минут



Сталь 40Х13
500ºС, 40 минут

Спасибо за внимание!