

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лекция 7. Поверхностная обработка (модификация поверхности и нанесение покрытий), сварка

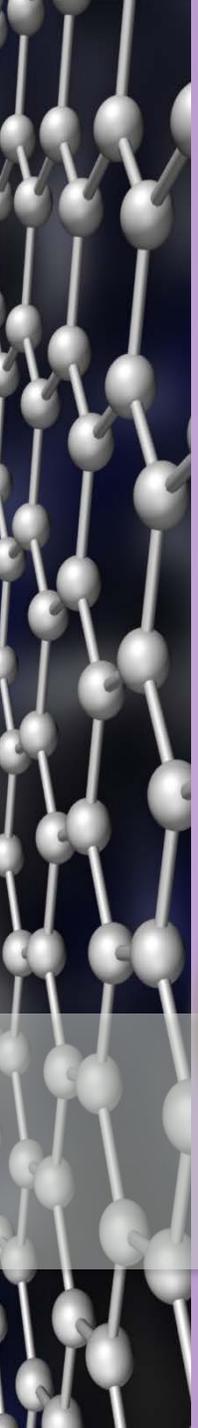
КЛИМЕНОВ Василий Александрович,
профессор ИШНПТ ТПУ

Дополнительная литература

- › Методы и средства измерений и контроля в машиностроении : учебное пособие / сост.: В.А. Литвинова, С.В. Мелентьев, В.А. Клименов и др. ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 77 с.
- › А.М. Лидер, А.П. Мамонтов, В.А. Клименов, И.П. Чернов Физические основы современных технологических процессов //Монография, Томск: Дельтаплан, 2012.-175 с.

Содержание лекции

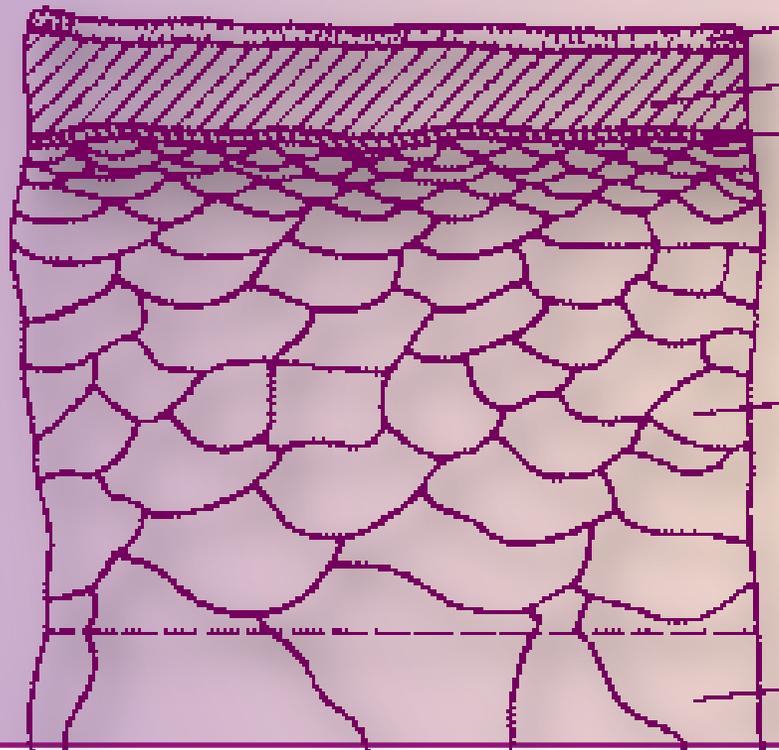
- › Классификация методов поверхностной обработки материалов
- › Поверхностная термо- и термохимическая обработки
- › Поверхностная термообработка высококонцентрированными источниками энергии
- › Поверхностная деформационная обработка. Электрофизическая поверхностная обработка
- › Обеспечение повышенных характеристик сталей и сплавов с помощью нанесения покрытий. Классификация методов
- › Металлургические аспекты соединения металлов сваркой и наплавкой
- › Соединение разнородных материалов



Основные понятия и определения

Схема поверхностного слоя (физическое представление)

Схема поверхностного слоя



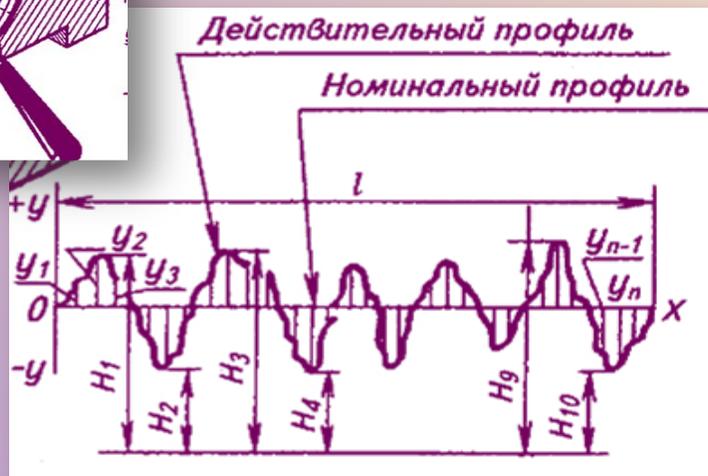
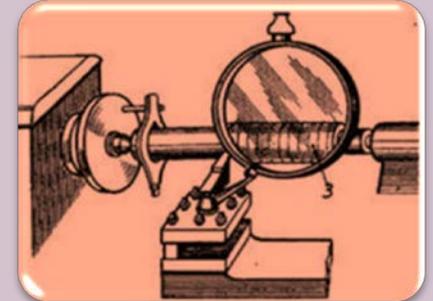
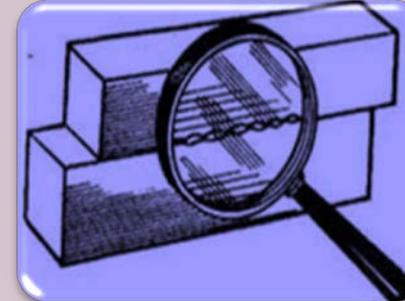
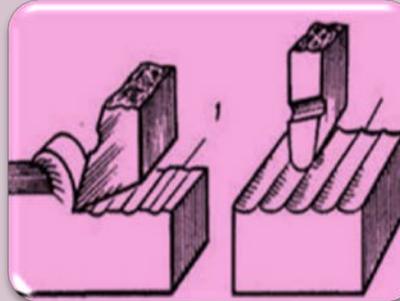
- 1 – адсорбированный слой (0,001– 1) мкм
- 2 – слой оксидов (1 – 10 мкм)
- 3 – переходный слой (10 – 30 нм)
- 4 – технологический слой (несколько мм)
- 5 – основной металл

- › Поверхность практически всех твердых тел вследствие сорбционной способности содержит различные загрязнения и примеси (адсорбированные газы и влагу из воздуха)
- › Оксиды – типичные загрязнения металлов
- › В зависимости от условий обработки и хранения металла толщина и химический состав оксидов могут сильно различаться

Ювенильная поверхность — свежесформованная поверхность металла, свободная от окислов и других загрязнений

Строение поверхности детали

- › Среднее арифметическое отклонение профиля - среднее расстояние между отдельными точками профиля до средней линии гребешков



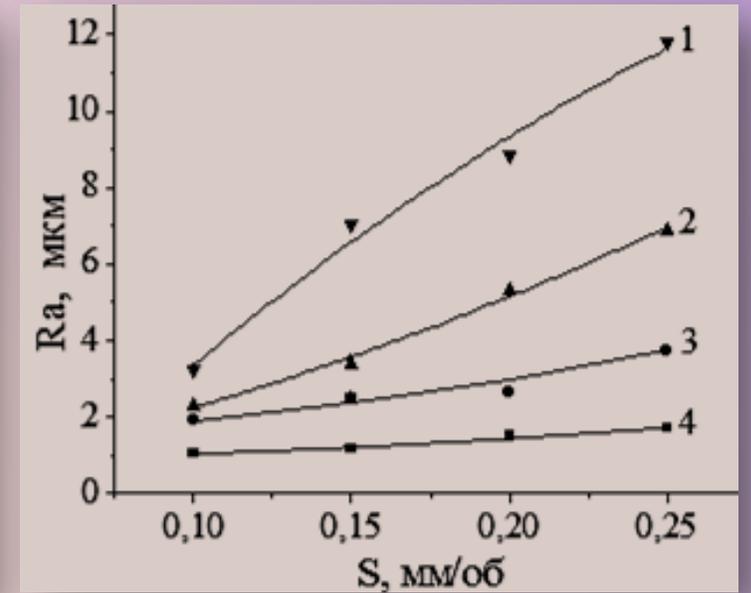
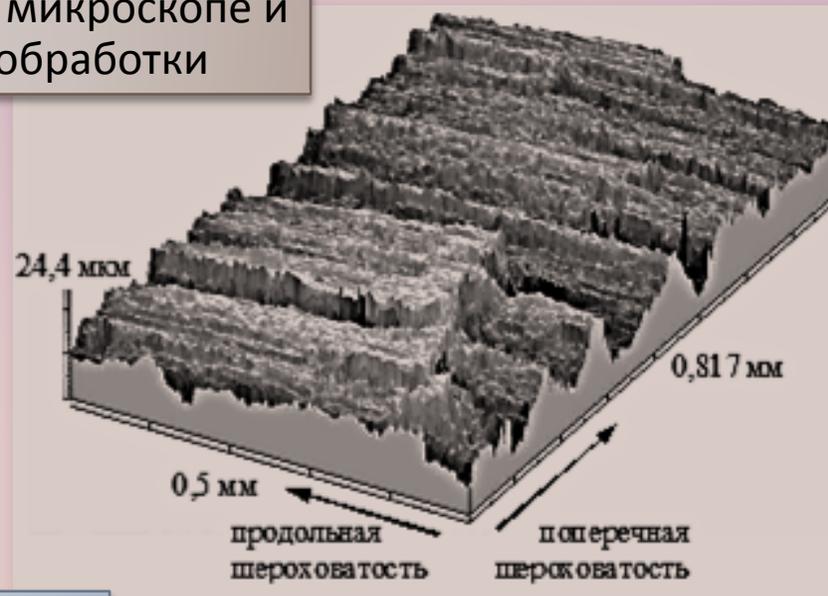
Шероховатость – совокупность всех миконеровностей, образующих рельеф поверхности детали

ГОСТ 2789-73. Требования к шероховатости устанавливаются исходя из функционального назначения поверхности

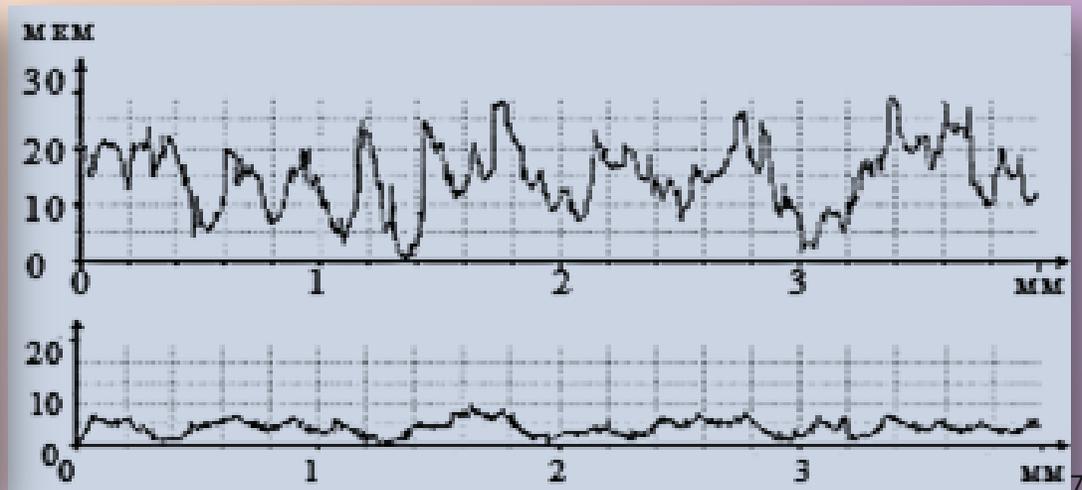
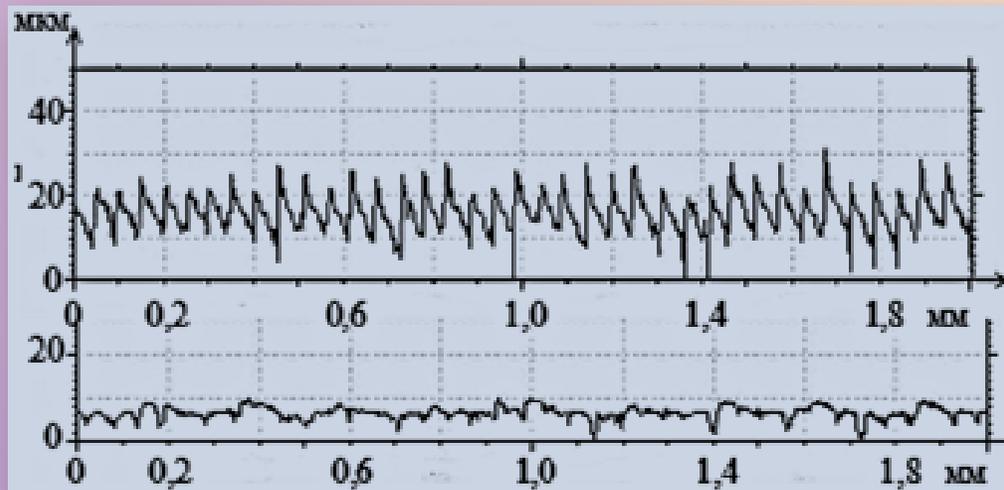
Шероховатость оценивается **количественно** (по одному из параметров с помощью приборов) или **качественно** (в сравнении с ее образцами)

Строение поверхности детали

Поверхность в атомно-силовом микроскопе и её характеристики от режимов обработки



Профилограммы поверхностей



Инженерия поверхности

- › Объединяет методы направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материалов путем **деформирования, модифицирования, нанесения пленок, покрытий, защитных слоев** различными методами. Комплексное использование достижений фундаментальных наук обеспечивает создание и практическое использование ее подходов



ТРИБОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ В СРЕДЕ СМАЗКИ С НАНОКОМПОНЕНТАМИ



ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ

- › **Модификация поверхности** - изменение химического состава или структуры поверхности энергией или пучком частиц

ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ



ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА



ИНДУКЦИОННАЯ НАПЛАВКА



ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПЛАКИРОВАНИЕ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ



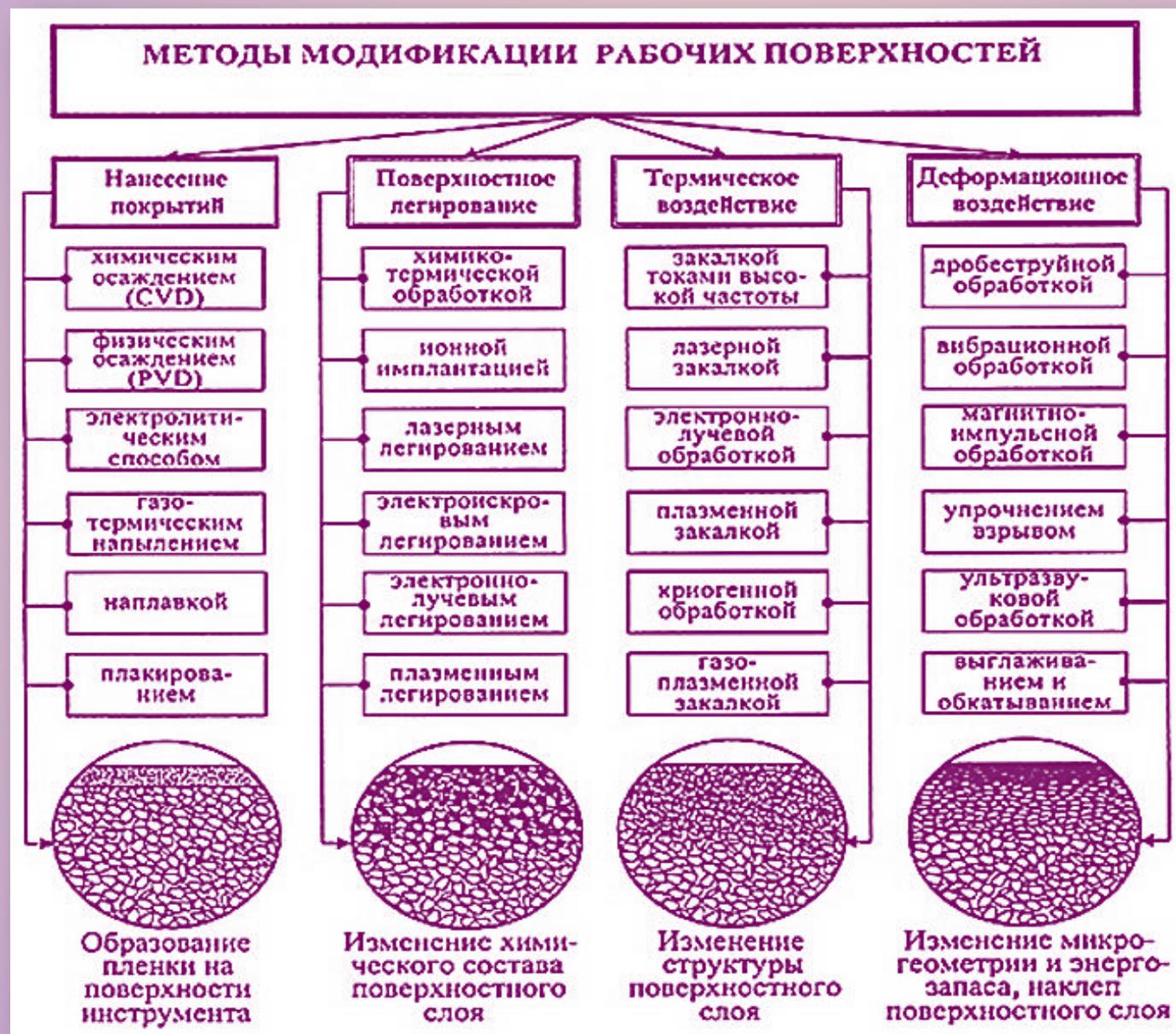
МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ Al

- › Поверхность деталей машин рассматривается как технический объект в виде системы, определяющей связь параметров поверхности на этапах **конструирования, технологии производства и эксплуатации**. Вследствие технологической наследственности, при изготовлении детали и релаксационных процессов при ее эксплуатации, постоянно изменяются **химические и физико-механические** свойства металла поверхностного слоя
- › **Технологическая наследственность** – перенос свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим

Перечень решаемых задач

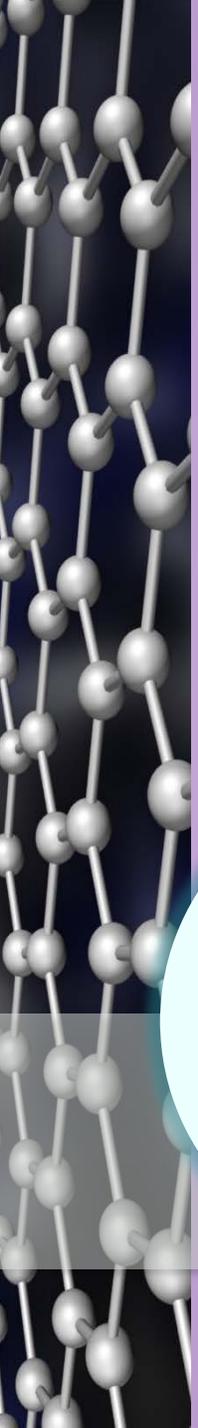
- › Повышение твёрдости поверхностных слоёв при более мягкой и пластичной сердцевине детали, что сказывается на **надёжности** работы детали
- › Придание поверхности детали повышенных прочностных свойств, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности и **обеспечение работоспособности и долговечности** в широком диапазоне характеристик внешних воздействий
- › Придание поверхности деталей и изделий уникальных свойств (триботехнических, биоинертных и биосовместимых, диэлектрических), обеспечивающих **расширение областей применения** традиционных материалов

Классификация методов модифицирования поверхности



Классификация методов поверхностной обработки





Поверхностная термообработка и химико-термическая обработка

Термическая обработка металлов

- › Совокупность операций нагрева и охлаждения с целью изменить структуру и свойства сплава в нужном направлении
 - Упрочняющая – **повышает** твердость, прочность и износостойкость
 - Разупрочняющая – **повышает** пластические свойства и вязкость, **снижает** твердость и сопротивление деформации и разрушению
- › Для стальных изделий применяются оба варианта обработки



Упрочнение методом поверхностной закалки

- › **Закалка токами высокой частоты** (Вологдины В.П.) Индукционный ток возникает в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Токи замкнуты в толще проводника и называются **вихревыми** или **токами Фуко**.
- › **Особенность:** ток вытесняется на поверхность проводника: вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, на поверхности – в том же направлении (**скин-эффект**, от *skin* – кожа, оболочка). При частоте **50 Гц** ток равномерно распределен по объему провода диаметром 10 мм, при **10^8 Гц** глубина проникновения **$7 \cdot 10^{-3}$ мм**, ток течет по поверхности провода
- › Чем больше частота тока, тем тоньше нагретый закаленный слой (**5 мм**). Используются машинные генераторы с частотой **5–15 кГц**, ламповые – до **1 МГц**. Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, зазор между индуктором и поверхностью изделия равномерный и минимальный
- › Вследствие большой скорости нагрева и отсутствия выдержки получается мелкое зерно аустенита. При закалке образуется **мелко-игольчатый мартенсит** с твердостью на **3–6 HRC** выше, чем при печном нагреве. Перед закалкой изделие подвергают нормализации, после – низкому отпуску. Используется для изделий из сталей с содержанием углерода **0,4–0,6 %**
- › **Преимущество:** высокая производительность, отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности, закалочных трещин, возможность автоматизации процесса, закалки отдельных участков детали.
Недостаток: высокая стоимость

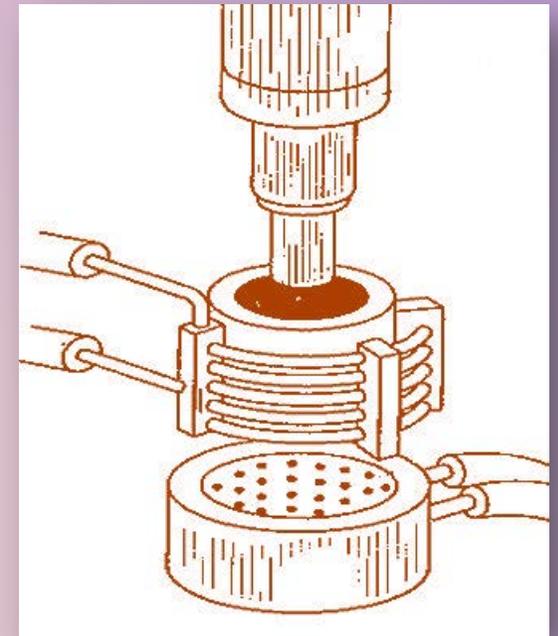


Схема процесса

Газопламенная закалка

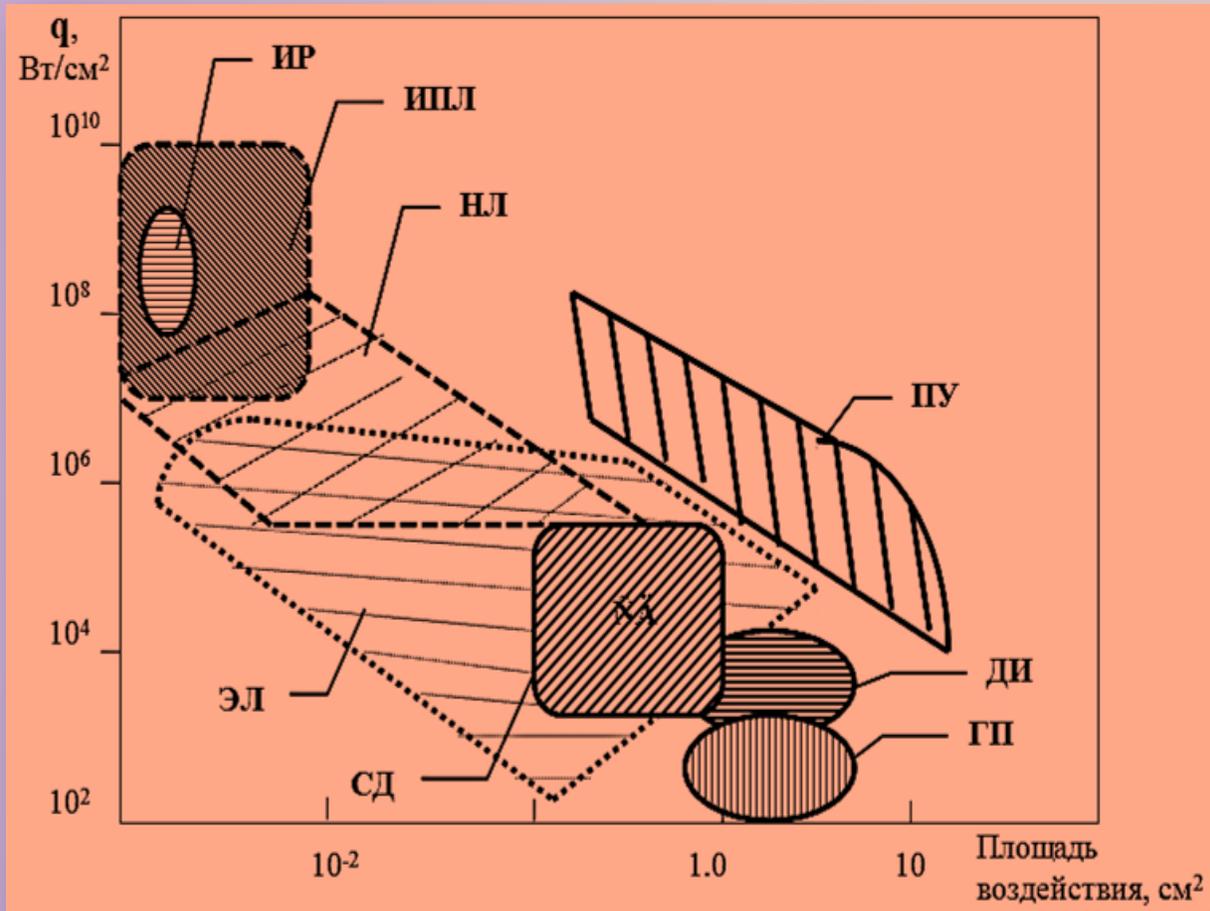


- › **Недостатки:** невысокая производительность, сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность недогрева или перегрева)

- › Нагрев осуществляется газо- или керосино-кислородным пламенем при **3000–3200°C**. Структура поверхностного слоя после закалки – **мартенсит** или **мартенсит и феррит**. Толщина закаленного слоя **2–4 мм**, твердость **50–56 HRC**
- › Применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность (косозубые шестерни, червяки), стальных и чугунных прокатных валков.

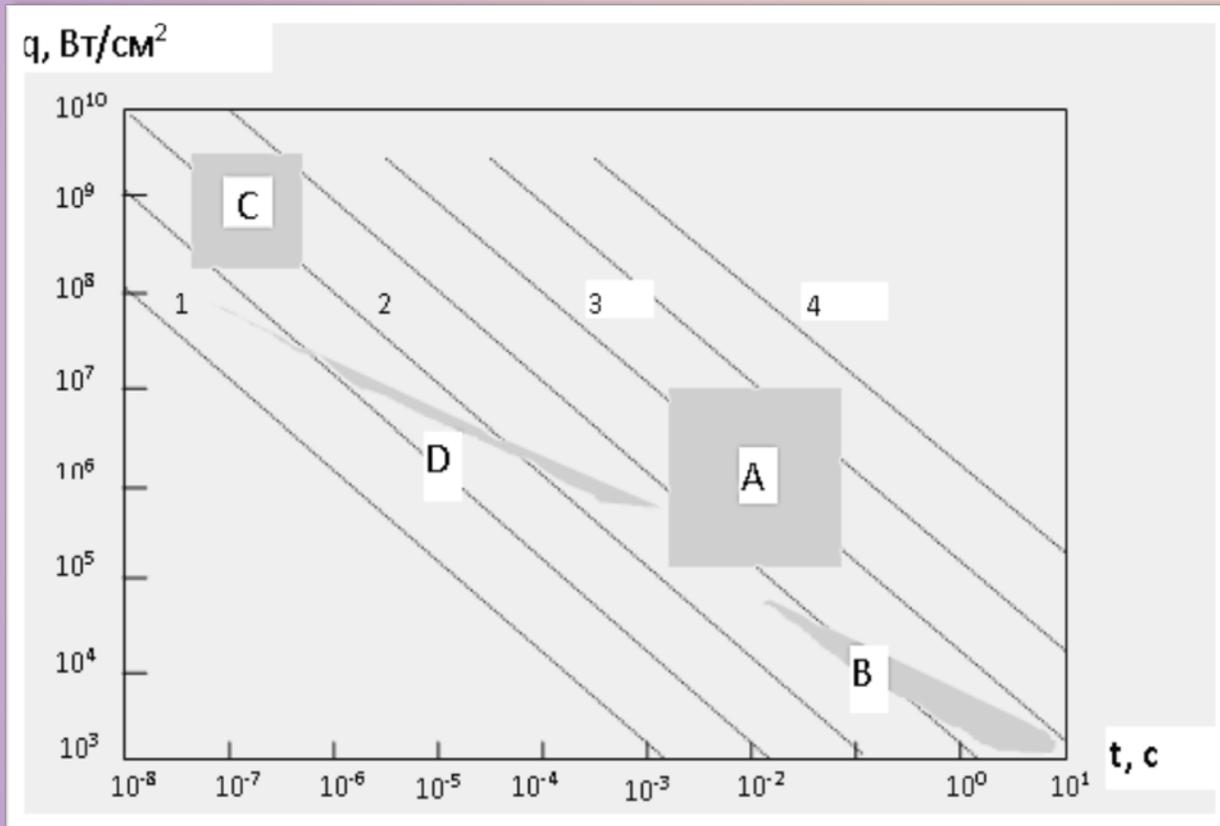
Мелкосерийное и индивидуальное производство, ремонтные работы

Эффективная площадь воздействия и удельная мощность



Соотношение эффективной площади воздействия и удельной мощности для газопламенного (ГП) и электродугового источников (ДИ), сварочной дуги (СД), электронного луча (ЭЛ), плазменного ускорителя (ПУ), непрерывного лазерного луча (НЛ), импульсно-периодического лазерного луча (ИПЛ) и электроискрового разряда (ИР)

Удельная мощность и время взаимодействия



Зависимость удельной мощности q от времени взаимодействия t с веществом для различных значений удельной энергии (Q): 1- 10^0 Дж/см^2 , 2- 10^2 Дж/см^2 , 3- 10^4 Дж/см^2 , 4- 10^6 Дж/см^2

А- закалка плавлением с глубоким проникновением, В - упрочнение за счет фазового превращения, С - импульсное упрочнение, D - быстрое поверхностное плавление-затвердевание

Химико-термическая обработка

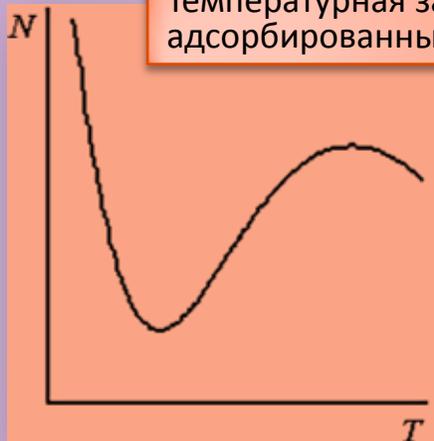
- › **Химико-термическая обработка** - изменение химического состава, свойств поверхности изделия под действием температуры и окружающей среды заданного состава
- › Применяется для повышения поверхностной твердости, износостойкости, антизадирных свойств, усталостной прочности. Защита поверхности деталей от коррозии в агрессивных средах (силицирование, хромирование) и образования окалины (алитирование)
- › Для резкого повышения сопротивления абразивному изнашиванию перспективны **борирование, азотирование, диффузионное хромирование** позволяют получить в поверхностном слое бориды железа, карбиды хрома или др. химич. соединения металлов высокой твердости
- › Деталь помещают в среду, богатую элементом, который диффундирует в металл. Происходят **диссоциация** (деление) молекул на атомы, **адсорбция** (осаждение) их на поверхности и **диффузия** (проникновение) вглубь материала

Химико-термическая обработка

› **Диссоциация** – химич. реакция обратимого распада молекул и образования атомов диффундирующего элемента

- Термическая - при повышении температуры
- Электролитическая - при растворении электролитов (расщепление молекул электролита на ионы)
- Фотохимическая - при действии света
- Количественная характеристика - **степень диссоциации** (отношение числа распавшихся молекул к общему числу)

Температурная зависимость адсорбированных атомов



› **Адсорбция**

- Физическая - за счет **ван-дер-ваальсовых** взаимодействий, обратима, адсорбция уменьшается при повышении температуры
- Химическая (хемосорбция) - путем химич. взаимодействия, необратима, локализована, молекулы не могут перемещаться по поверхности. Например, кислород на металлах при низких температурах адсорбируется по законам физической адсорбции. При повышении температуры начинается химическая адсорбция
- С некоторой температуры химич. адсорбция перекрывает падение физической адсорбции, поэтому температурная зависимость адсорбции имеет **выраженный минимум**

› **Диффузия** – проникновение атомов вглубь материала. На поверхности концентрация диффундирующего элемента наибольшая, по мере удаления от поверхности падает. Глубина проникновения атомов – толщина насыщенного слоя. Процесс характеризуется **коэффициентом диффузии D** ($\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$) (количеством атомов, продиффундировавших через площадку в 1 см^2 в течение 1 с при перепаде концентраций по обе стороны площадки, равном 1)

$$D = A \exp(-E_a / k T)$$

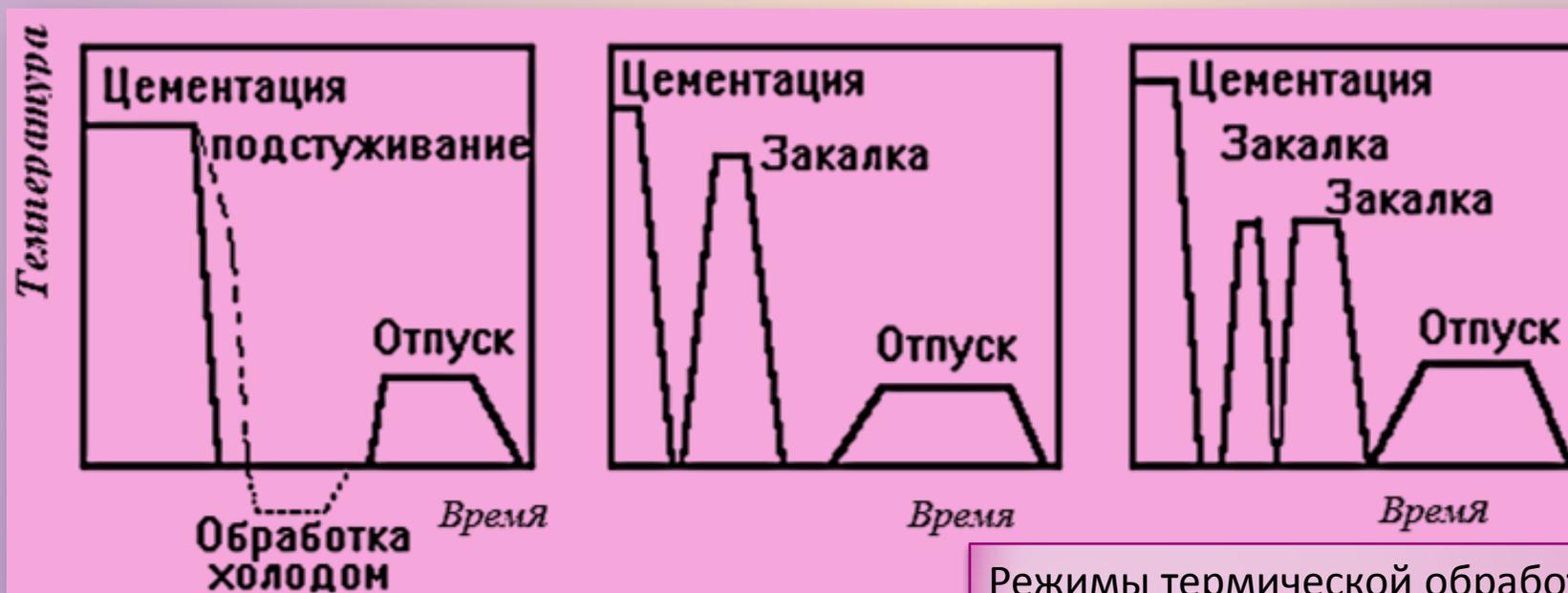
A - коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки; E_a - энергия активации диффузии (эВ); T - абсолютная температура (К); k - постоянная Больцмана ($0,8617 \cdot 10^{-4}$ эВ/К)

Чем больше E_a , тем меньше D

- › **Цементация** – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей **атомами углерода** для достижения высокой твердости и износостойкости поверхности детали в сочетании с ее вязкой серединой
- › На цементацию поступают механически обработанные детали с припуском на шлифование **50–100 мкм** (стали с содержанием углерода 0,1–0,2 %). Осуществляется процесс цементации при высокой температуре (**900–950 °C**), когда сталь находится в аустенитном состоянии (γ -железо растворяет не более **0,02 %** углерода). Детали помещаются в среду определенного состава – **карбюризатор**
- › В качестве **твердого карбюризатора** используют смесь **древесного угля** с добавлением **катализаторов**: 20–25 % BaCO_3 и 3,5–5,0 % CaCO_3
- › При термическом разложении карбюризатора образуется атомарный углерод, который диффундирует в поверхностный слой металла
$$2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} \quad \text{BaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{BaO} + 2\text{CO} \quad 2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}.$$
- › Длительность процесса от 5 до 24 часов, глубина науглероженного слоя составляет **0,4-2,5 мм**. Чем дольше процесс, тем больше глубина насыщения поверхности стали углеродом

Цементация

- › Для измельчения зерна детали после цементации охлаждают до комнатной температуры и выполняют закалку с температуры, оптимальной для цементованного слоя с последующим низкотемпературным отпуском
- › Для повышения механических свойств деталей, после цементации выполняют двойную закалку (сначала для сердцевины, а затем для поверхностного слоя) с последующим низкотемпературным отпуском
- › Особый случай – **сквозная** цементация тонких штампованных деталей из низкоуглеродистой стали (**детали пишущих машин, роликовых цепей**)



Режимы термической обработки цементованных деталей

Азотирование

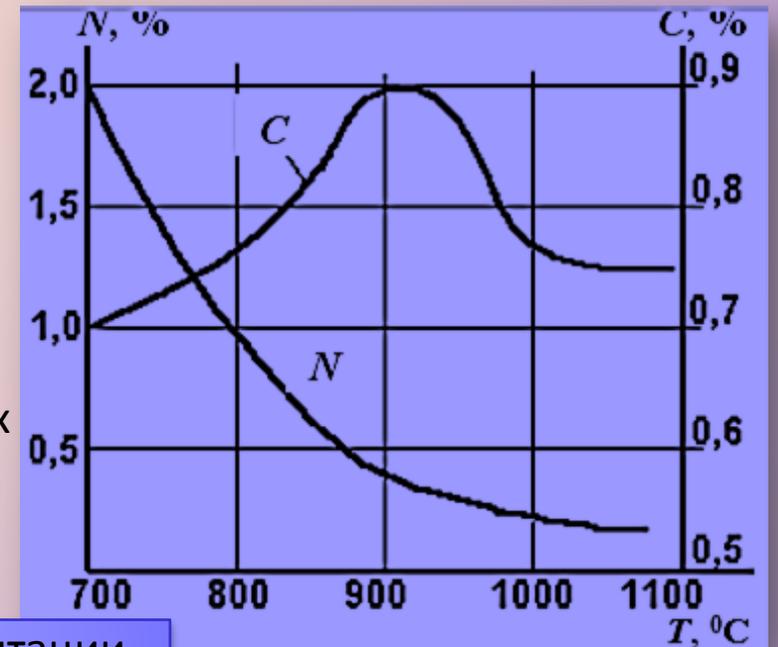
- › **Азотирование** - диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных деталей атомами азота. Достигается более высокая твердость (**70-72 HRC**) и износостойкость, чем при цементации, увеличивается коррозионная стойкость стали в атмосфере и усталостная прочность
- › Высокая твердость слоя сохраняется при нагреве до **500°C**, цементованного – до **200°C**. Осуществляется при **500–550 °C** в атмосфере аммиака, который разлагается с образованием атомарного азота, диффундирующего в поверхность металла:



- › Азот образует с железом и легирующими элементами **нитриды** (Fe_4N , Fe_2N , CrN , MoN , AlN), которые имеют более высокую твердость, чем карбиды железа. Мелкие частицы нитридов (толщиной до **2–4 нм**) - эффективное препятствие для движения дислокаций. Скорость диффузии при низких температурах мала, процесс азотирования идет медленно. Слой **0,1–0,8 мм** при **500–550 °C** образуется за 3-90 ч.
- › Азотирование – заключительная стадия в технологическом процессе, заменяет **отпуск**. Проводится после полной механической обработки и закалки. Азотированию подвергаются **конструкционные, среднеуглеродистые стали**, легированные хромом, алюминием и др. элементами (38ХМЮА)

Нитроцементация

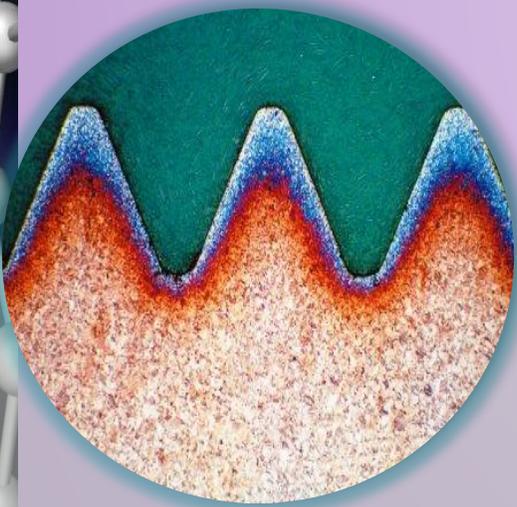
- › Одновременное диффузионное насыщение поверхностного слоя деталей **азотом и углеродом**
- › По свойствам нитроцементированный слой занимает промежуточное положение между **цементуемыми и азотированными** слоями
- › Процесс осуществляется в газовой смеси (свильный газ, метан) или жидкой среде. Длительность в газовой среде от 2 до 12 ч. После необходима упрочняющая термическая обработка – **закалка и низкотемпературный отпуск**. В структуре слоя образуются мартенсит, карбонитридные и нитридные мелкие частицы. Твердость **67-68 HRC**
- › Температура и длительность обработки влияют на концентрацию и соотношение элементов в поверхностном слое
 - При высокотемпературной обработке (**820-850°C**) - слои **1,5–2,0 мм**, в которых много углерода, но мало азота
 - При низкотемпературной (**530-570°C**) слои тоньше, в них много азота, но мало углерода
- › **Цианирование** - низкотемпературный процесс в жидкой среде. Нитроцементации подвергают детали, инструмент из легированных сталей. Режим обработки и глубину упрочненного слоя выбирают в зависимости от условий работы, действующих нагрузок, срока службы



Температурная зависимость газовой нитроцементации и содержания азота и углерода в поверхностном слое

Диффузная металлизация

- › Диффузионное насыщение стали различными элементами
- › Жидкостная - деталь погружают в расплав металла
- › Твердая и газовая – насыщение поверхности деталей происходит с помощью летучих соединений хлора с металлами (AlCl_3 , CrCl_3 , SiCl_4)
- › Алитирование
- › Хромирование
- › Борирование
- › Сульфоцианирование
- › Силицирование
- › Титанирование

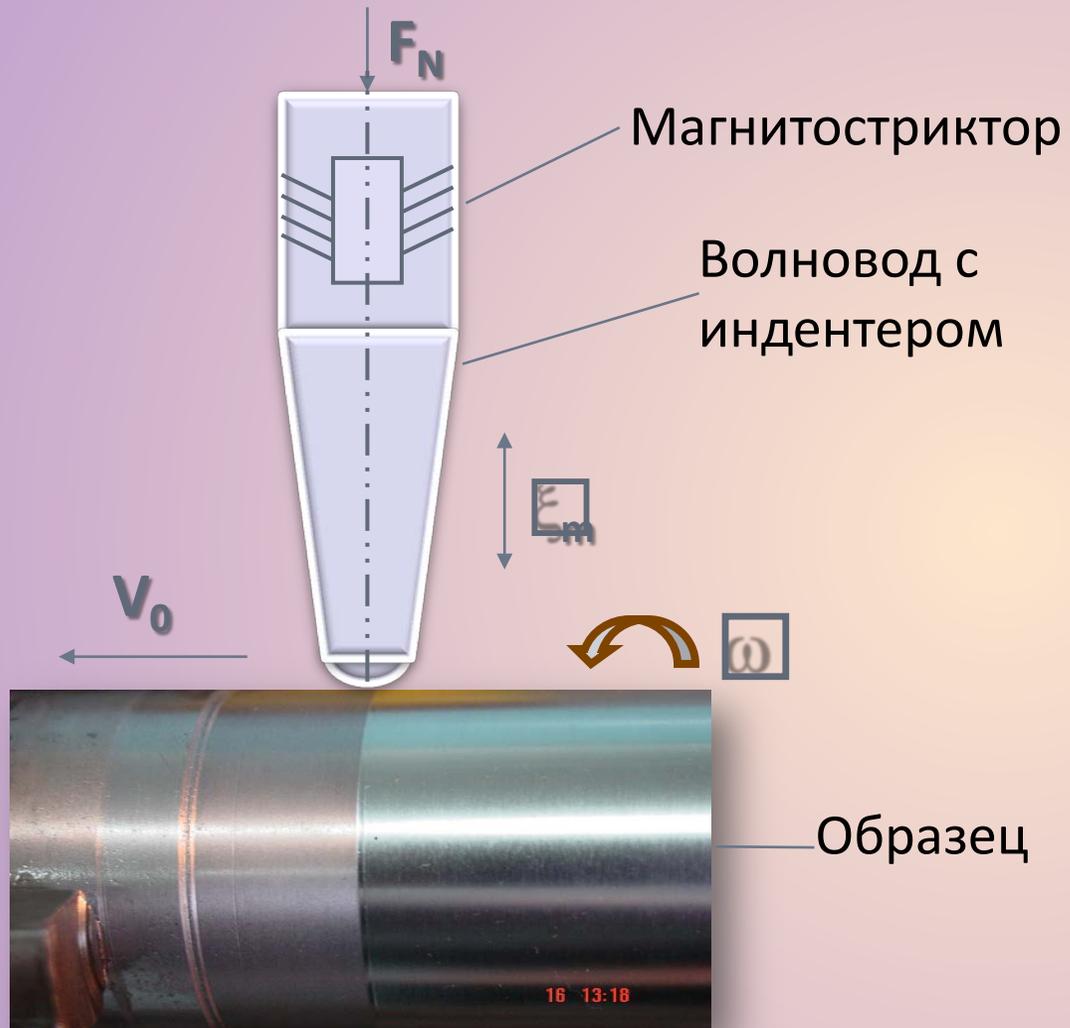


Поверхностное деформационное упрочнение деталей

Упрочнение методом пластической деформации

- › Местной упрочняющей обработке подвергаются детали различных форм и размеров, изготовленные из конструкционных материалов – **сталей, чугунов, алюминиевых и титановых сплавов**
- › **Дробеструйная обработка** - на установках, выбрасывающих на поверхность детали стальную или чугунную дробь, а также стеклянные и керамические шарики (для мягких материалов) диаметром **0,2–4 мм**. Происходит очистка поверхности (удаление загрязняющих веществ, окалины) и пластическая деформация металла на глубину **0,01–0,4 мм**. **Автомобильная, авиационная промышленности**. Упрочняют детали в канавках, на выступах. Обрабатывают **пружины, рессоры; звенья цепей, гусениц; поршни; зубчатые колеса**
- › **Обработка роликами** (раскатывание, накатывание) - деформация давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит **наклеп** на нужную глубину. Обрабатывают **шейки валов, проволоки, при калибровке труб, прутков**. Не требуется специальное оборудование, можно использовать токарные станки. Глубина упрочненного слоя при обкатке достигает **1,5 мм**

Ультразвуковая обработка

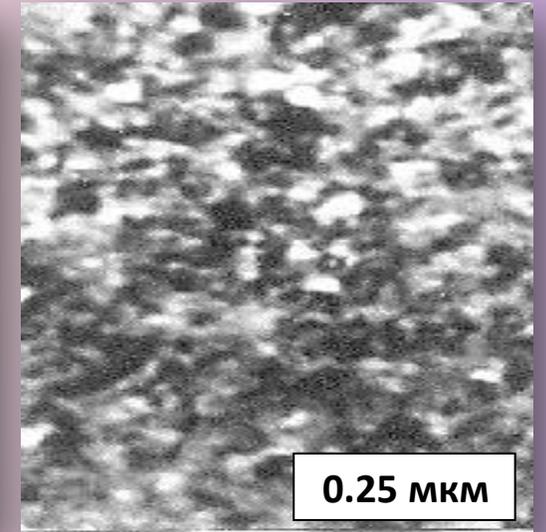
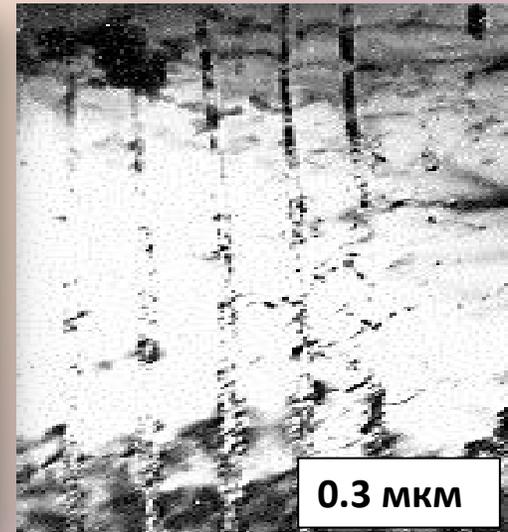
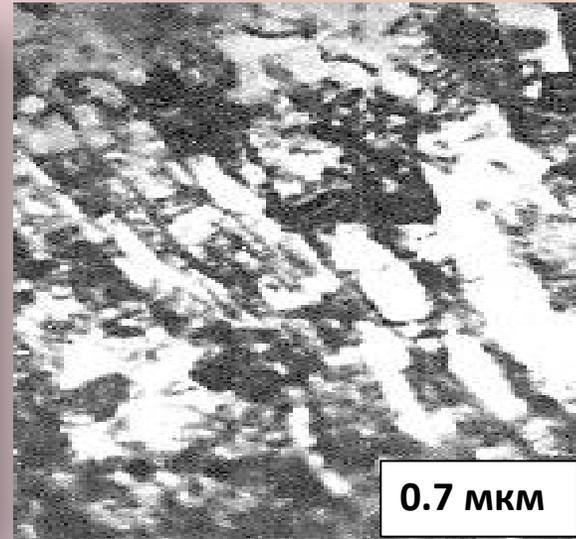
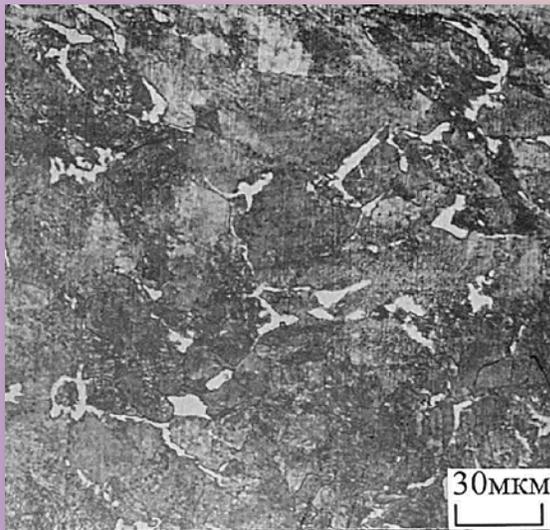


Обработка поверхности



Ультразвуковая обработка

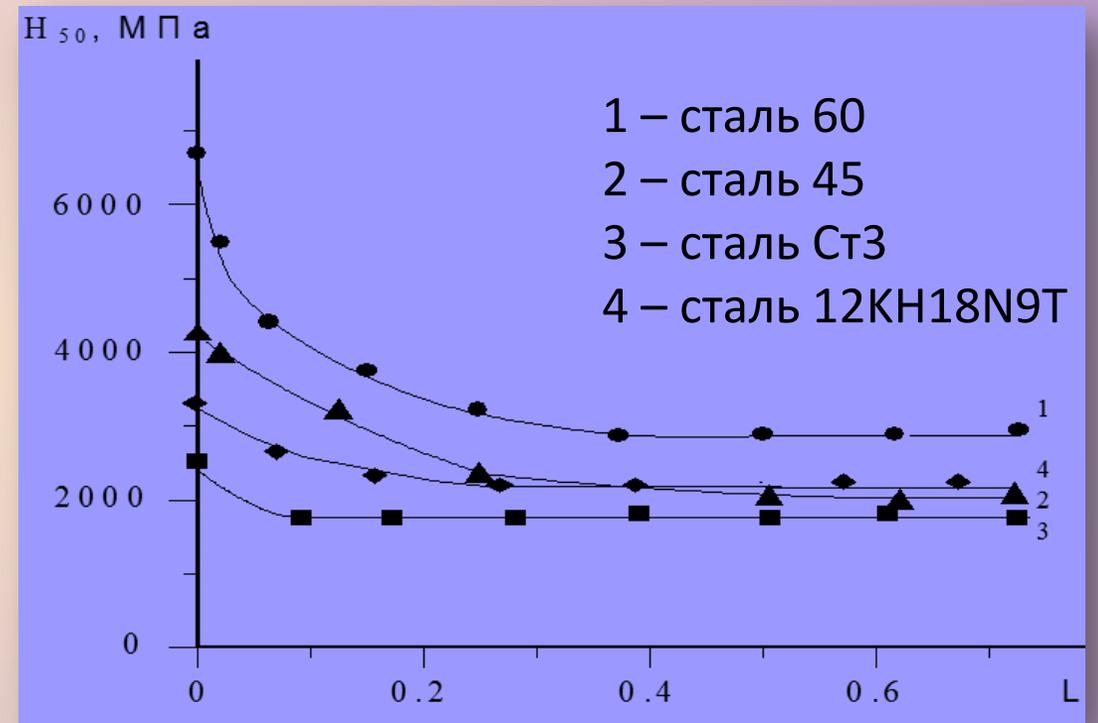
Металлографическое • Электронно-микроскопические изображения стали 60 после УФО



Ультразвуковая обработка



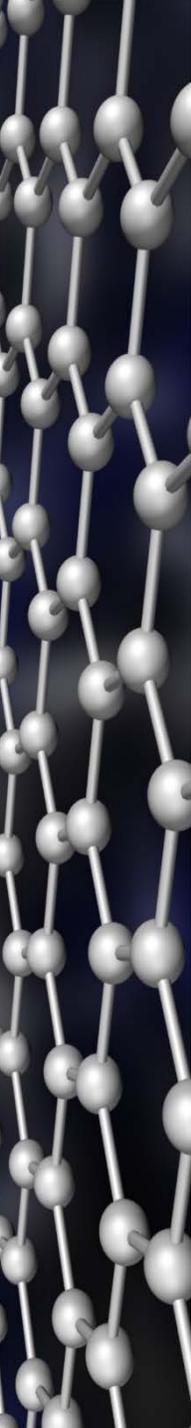
Распределение остаточных напряжений



Распределение микротвердости

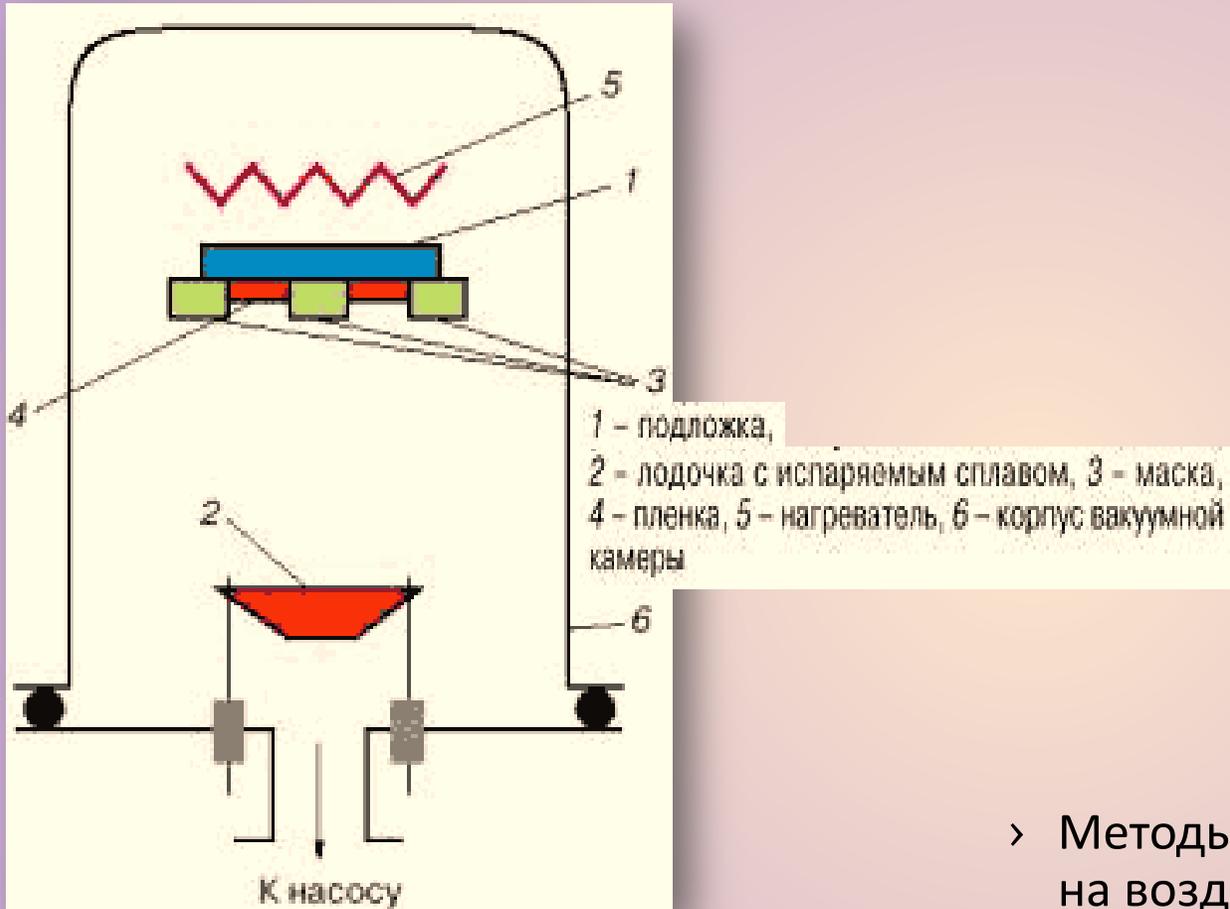


Нанесение защитных покрытий



Вакуумные технологии модифицирования поверхностей

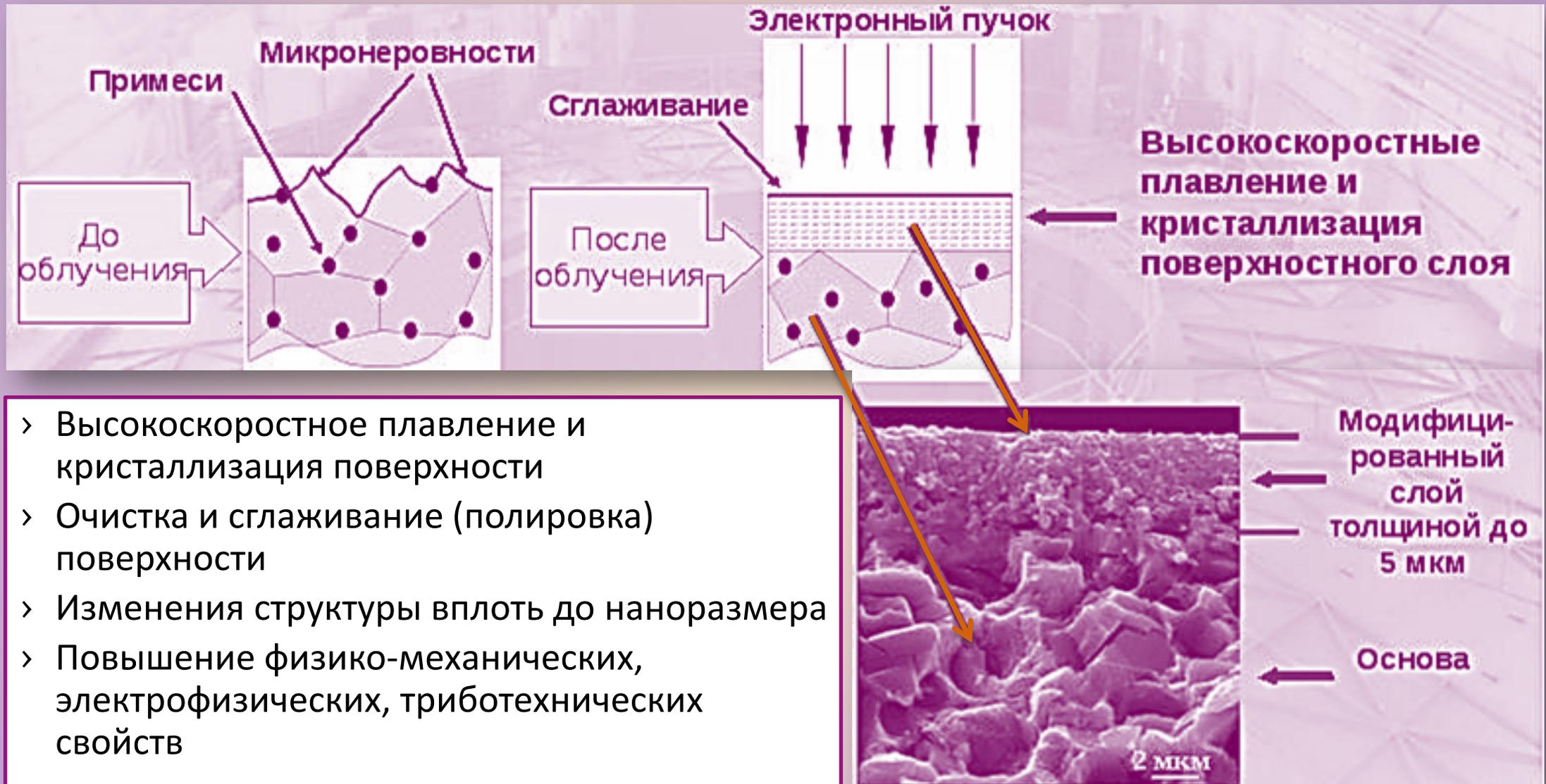
Испарительная часть
вакуумной установки



- › **Вакуумный ионно-плазменный метод**
- › Прямое преобразование эклектической энергии в энергию технологического воздействия, основанного на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру

Особенности строения модифицированных слоев

Импульсная электронно-пучковая обработка



- › Высокоскоростное плавление и кристаллизация поверхности
- › Очистка и сглаживание (полировка) поверхности
- › Изменения структуры вплоть до наноразмера
- › Повышение физико-механических, электрофизических, триботехнических свойств

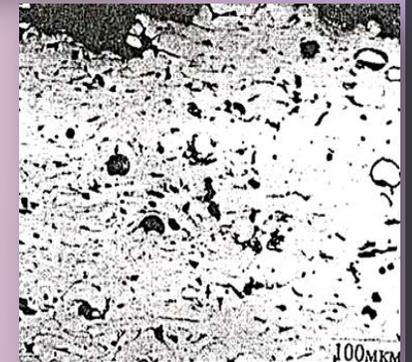
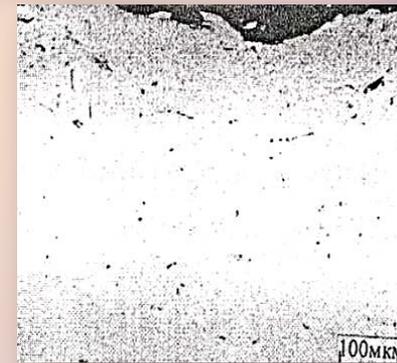
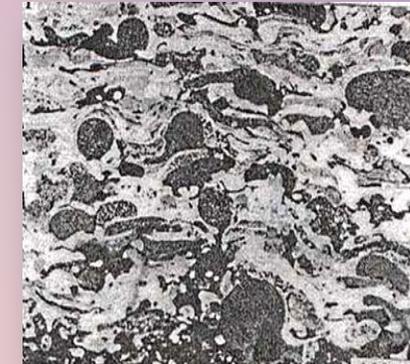
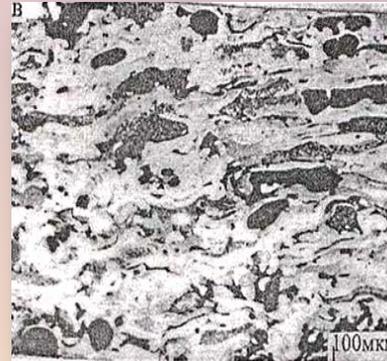
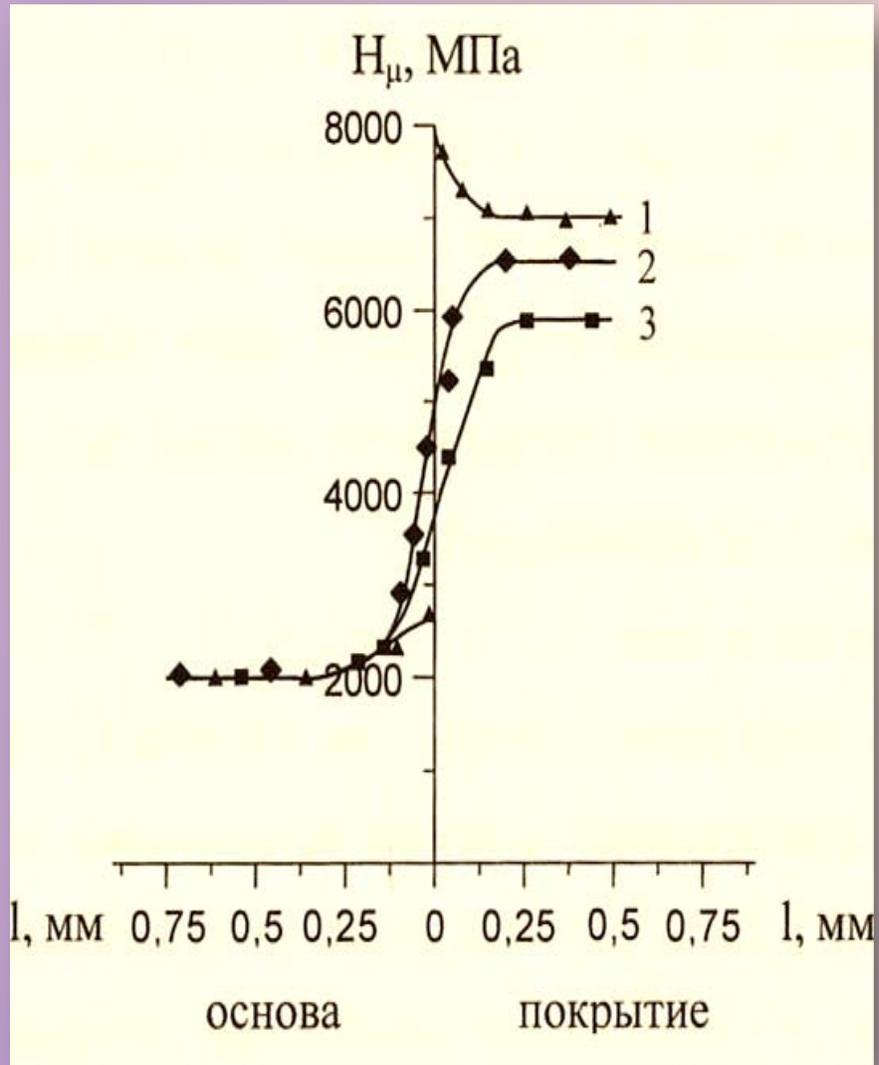
Газотермическое напыление

- › Процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя нужного материала. Похоже на сварку
- › Цель **сварки** — соединение конструктивных элементов сооружений
- › Цель **газотермического напыления** — защита поверхности от коррозии, износа
- › **Напыление**
 - Газоплазменное
 - Высокоскоростное газоплазменное
 - Детонационное
 - Плазменное
 - Напыление с оплавлением
 - Электродуговая металлизация
 - Активированная электродуговая металлизация

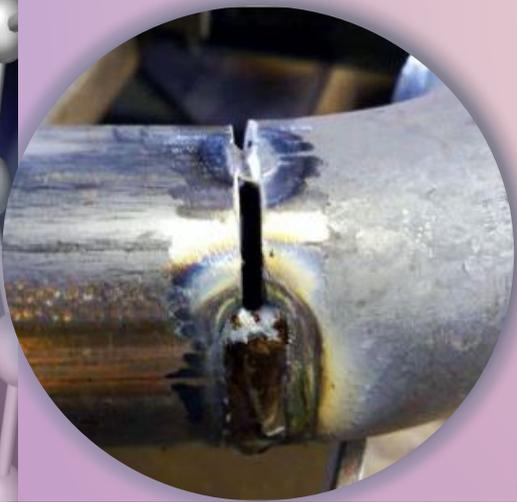
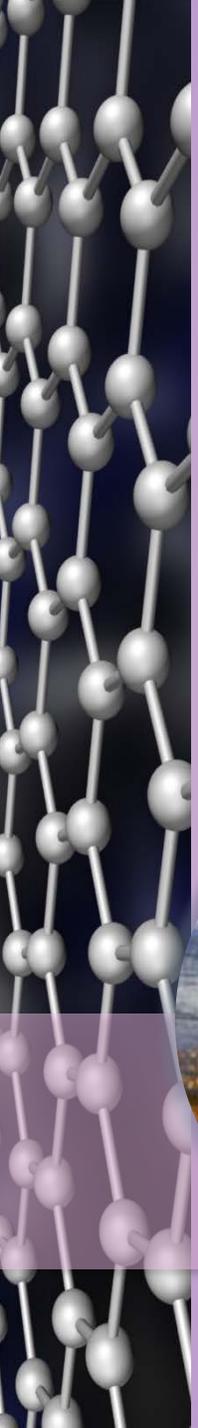


Газопламенное напыление

Микроструктура и свойства напыленных покрытий

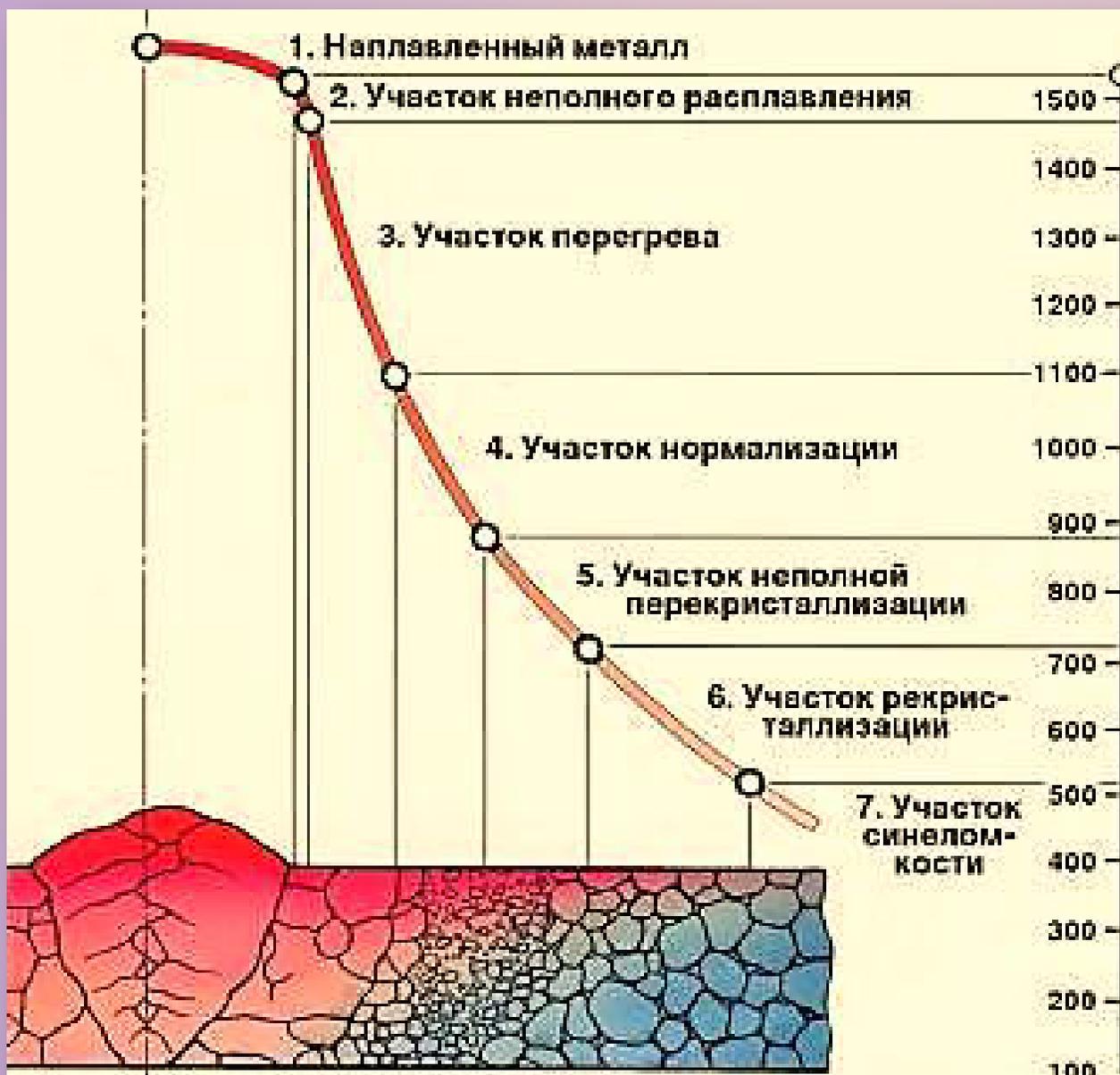


Распределение значений микротвердости вблизи границы раздела композиции “оплавленное покрытие-основа” при плотности мощности источника оплавления: 1 - $0,75 \cdot 10^9$ Вт/см², 2 - $1,02 \cdot 10^5$ Вт/см², 3 - $1,27 \cdot 10^5$ Вт/см²

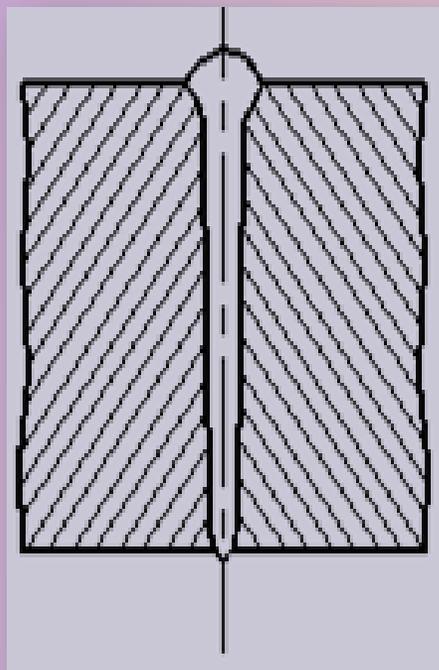


Сварка, соединение материалов

Строение сварного шва



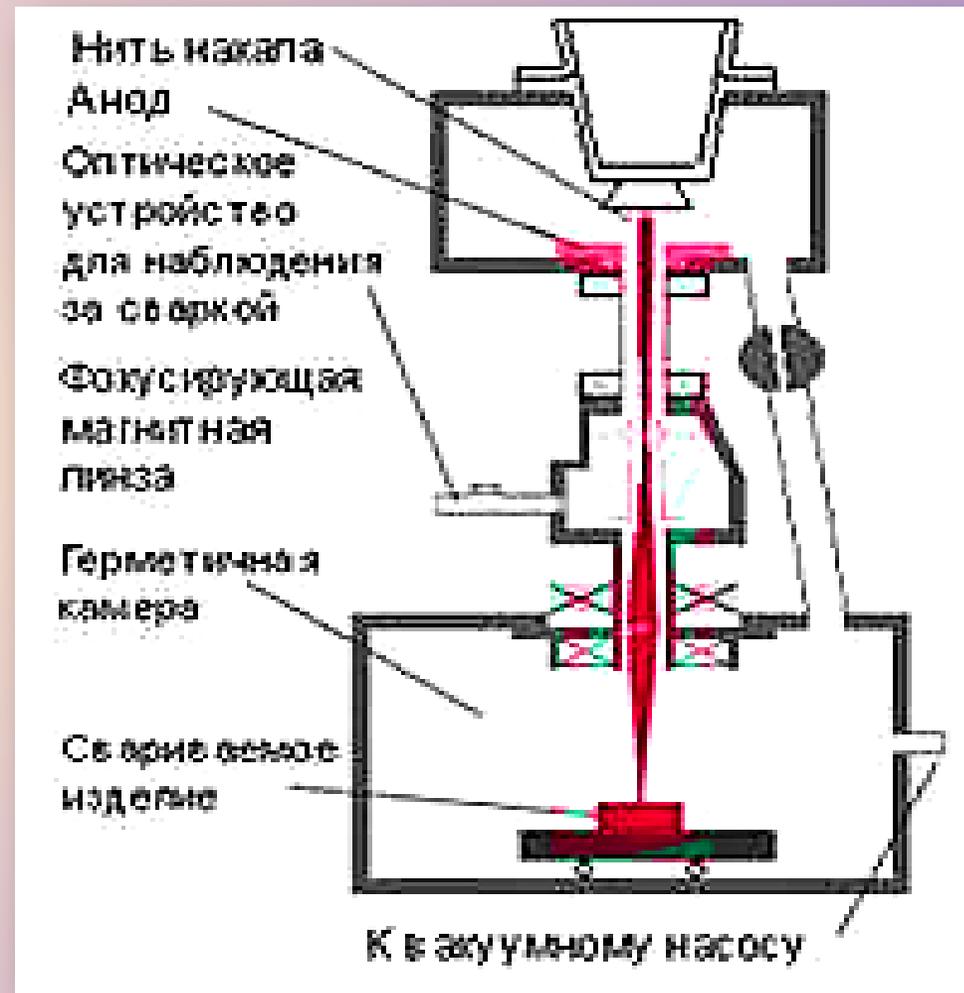
Сварка высокоэнергетическим источником



Форма сварного шва при

- › **Электронно-лучевая сварка**
- › Плотность мощности пучка электронов 10^5-10^7 Вт/см²
- › Испарение металла
- › Поверхность ванны прогибается
- › В жидком металле формируется **пародинамический канал** на всю глубину ванны
- › Канал образуется давлением отдачи испаряемого металла

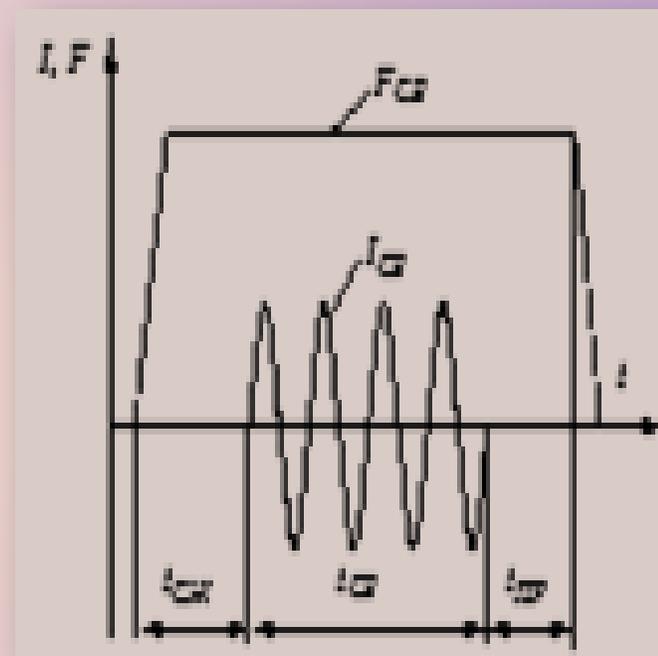
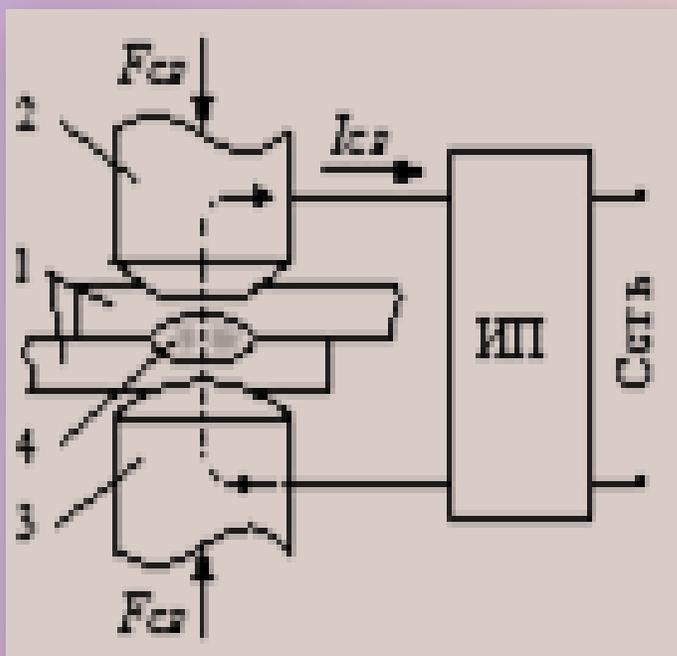
- › высокий вакуум (10^{-1} Па)
- › электроны, ускоренные электрическим полем
- › при соударении электроны тормозятся
- › энергия кинетическая - в тепловую
- › в месте соударения темп. **6000°C**
- › узкий и глубокий шов
- › глубина кинжального проплавления **200-400 мм**



Температура дуги увеличивается до 20 000 °C

Сварка точечным источником

Схема двухсторонней контактной точечной сварки



Цикл изменения параметров режима

1 — свариваемые детали; 2 и 3 — токопроводящие электроды; $F_{сж}$, $I_{св}$ — сварочные усилие и ток; $t_{сж}$ — время сжатия деталей; $t_{св}$ — время сварки (длительность импульса тока $I_{св}$); $t_{пр}$ — время проковки соединения.

Сварка трением с перемешиванием

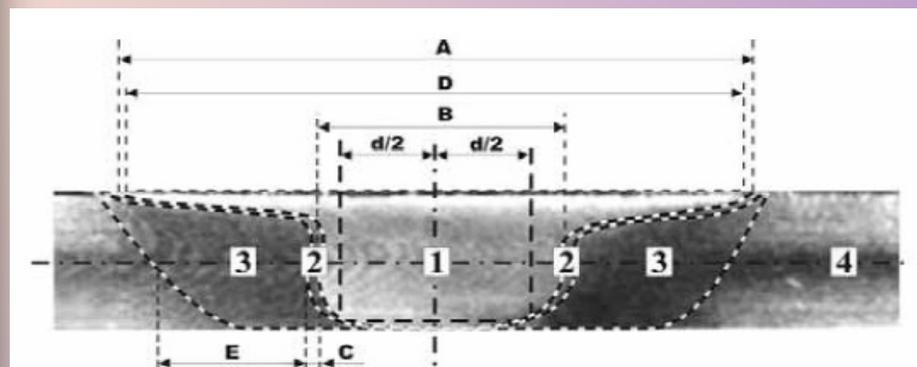
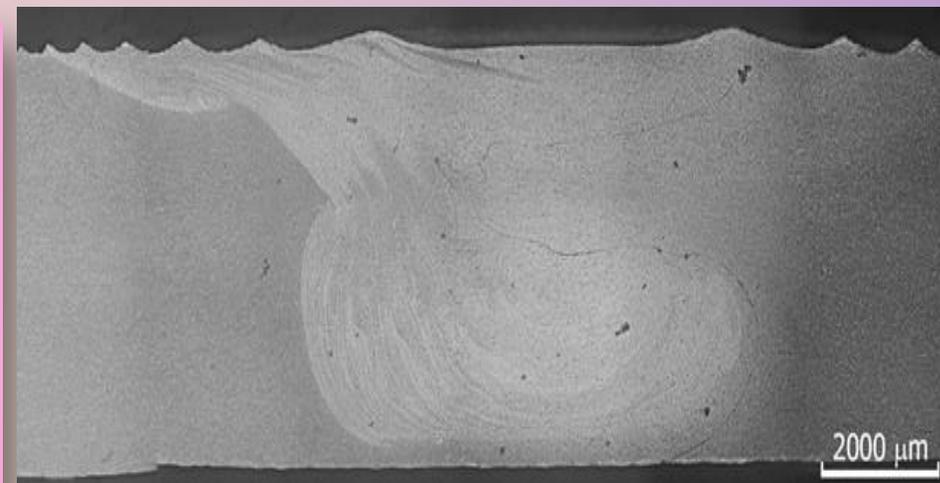


Рис. 4. Макроструктура сварного соединения, выполненного сваркой трением с перемешиванием, где 1 – сварной шов, 2 – зона термомеханического воздействия, 3 – зона термического влияния, 4 – основной металл
A, B – геометрические границы сварного шва, D – диаметр опорной поверхности уступа, d – диаметр наконечника, E, C – ширина зон термического и термомеханического воздействия

Сформированный сварочный шов

Соединение стекла и металла

- › Особую трудность представляет соединение **стекла с металлом**. Требуемая степень согласованности коэфф. теплового расширения стекла и металла зависит от вида соединения, пластичности металла и технологии отжига. Проблемой является и получение **вакуумно-плотного соединения** металла и стекла ввиду их плохой когезии. В этом случае поверхность металла предварительно оксидируют. В процессе пайки слой оксида металла до некоторой степени растворяется в стекле, улучшая когезию
- › В случае стеклометаллического соединения, работающего в широком диапазоне температур, необходимо рассматривать поведение **кривых термического расширения** используемых материалов во всей области температур - от комнатной до температуры размягчения стекла. Термическое расширение стекла изменяется линейно вплоть до точки отжига, где резко возрастает
- › Для чистых металлов термическое расширение близко к линейному при любых температурах. **Вольфрам**, может соединяться с **боро-силикатным стеклом**, а **молибден** - со стеклом марки **7052**, обладающим более низкой температурой плавления
- › Для соединения со **стеклом и керамикой** широко используют **железоникелевые сплавы, ковар**

Ковар - сплав из 29 % Ni, 17 % Co и 54 % Fe. Коэфф. теплового расширения, согласован с коэфф. теплового расширения боросиликатного стекла

Соединение керамики и металла

- › Из-за природной несовместимости металлов с керамикой и стеклом, сварка плавлением, непригодна
- › **Диффузионная сварка** - за счёт взаимной диффузии свариваемых поверхностей деталей на атомарном уровне
 - Полуавтоматическая и
 - Автоматическая сварки в различных пространственных положениях черных и цветных металлов и сплавов широкого диапазона толщин
- › **Диффузионная сварка** в вакууме разработана **Н. Ф. Казаковым** (1953). ГОСТ 19521-74
- › На свариваемость **стекла, ситаллов и керамики** с металлами влияет их химический состав, структура, состояние поверхности, наличие и концентрация неравновесных дефектов и др. физико-химических свойства соединяемых материалов.
- › На свариваемость **керамики с металлами** влияет ее **микроструктура**. Увеличение размеров зерен керамики, содержащей **стеклофазу**, приводит к уменьшению протяженности границ и участков активного взаимодействия
- › Наличие **стеклофазы** в керамике ускоряет процесс **сварки**, соединение получается более **прочным**

Природа и механизм образования соединения

- › Необходимым условием образования сварного соединения **металлов со стеклом и керамикой** является химическое взаимодействие, механизм которого зависит от свойств элементов. При **диффузионной сварке (ДС)** вероятны 2 топохимические реакции - **присоединения** и **замещения**



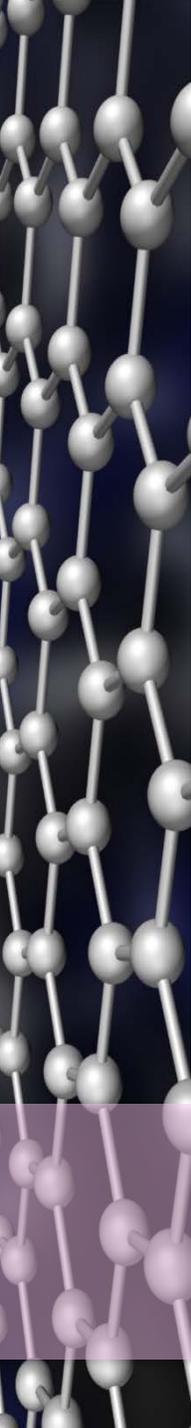
- › **Присоединения** - взаимодействуют d-элементы периодической системы Менделеева - все переходные металлы и сплавы на их основе (**Fe, Ni, Co, W, Mo, Mn**)
- › **Замещения** - взаимодействуют s- и p-элементы - непереходные металлы (**Al, Mg, Be, Li**) и их сплавы
- › ДС стекла и керамики с металлами должна производиться как с учетом физико-химических свойств соединяемых композиций, так и с учетом топохимических процессов, происходящих в зоне контакта

Образование дефектов

- › Самый распространенный дефект **стекло- и керамо-металлических** узлов - образование **трещин** из-за **остаточных напряжений**, вызванных большим различием коэфф. теплового расширения этих материалов
- › Согласование теплового расширения соединяемых материалов устраняет возникновение термических напряжений. Соединять материалы с несогласованными коэфф. возможно, но толщины металлической детали при этом сильно ограничены

Ключевые вопросы

- › Особенности строения поверхностного слоя. Физические и технические характеристики поверхностного слоя.
- › Инженерия поверхности – основные методы изменения свойств поверхностных слоёв. Классификация методов модификации и обработки поверхности.
- › Изменение структуры поверхностных слоёв после поверхностной термической обработки.
- › Особенности высокоэнергетических воздействий и основные процессы, определяющие структурообразование в поверхности.
- › Физико-химические процессы поверхностной химико-термической обработки. Основные методы ХТО.
- › Основные методы поверхностной деформационной обработки.
- › Ультразвуковая поверхностная обработка, как эффективный метод изменения структуры поверхностных слоёв сталей и сплавов и их свойств.
- › Повышение свойств сплавов нанесением защитных покрытий. Классификация методов нанесения покрытий.
- › Структура и свойства сварных соединений. Регулирование свойств сварных соединений.
- › Особенности соединения разнородных материалов. Физико-химические процессы при соединении разнородных материалов.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!