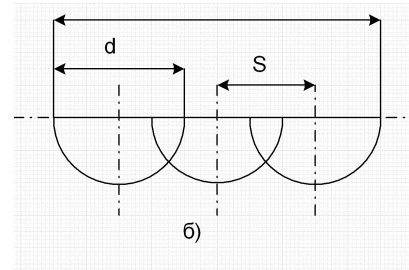
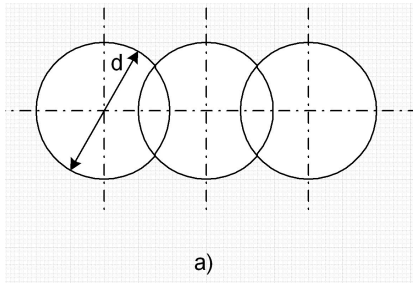


# Способы лазерного термоупрочнения

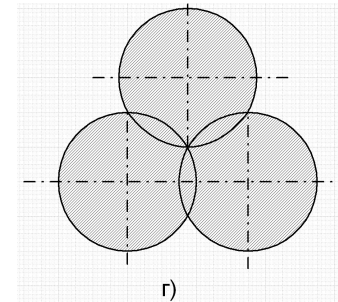
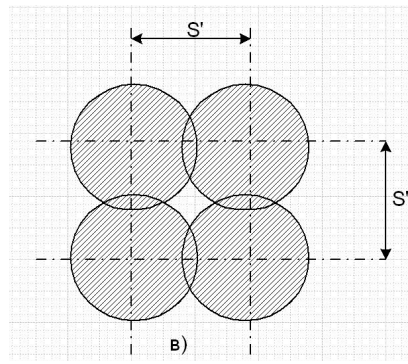
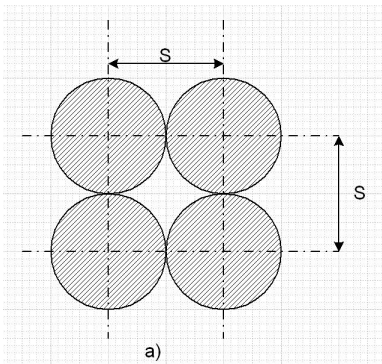
## Линейное упрочнение:



а) в плане;

б) в продольном сечении;

## Плоскостное упрочнение:



а) без перекрытия пятен;

в, г) с перекрытием пятен;

# Лазерная химико-термическая обработка

включает:

*образование активных атомов или ионов насыщаемого элемента;  
адсорбцию;  
диффузию.*

Рациональный режим характеризуется сбалансированностью этих элементарных процессов.

## Лазерная цементация

Лазерная цементация может проводиться из газовой среды: пропан – бутан, метан – аргон.  
Может применяться графитовая обмазка.

При лазерном нагреве чистого железа с оплавлением на поверхности может быть получена структура белого чугуна или аустенит + мартенсит.

Твёрдость поверхности 8680... 10650 МПа. Она обладает повышенной красностойкостью до 800 °С (HV=7500-8000 МПа).

Лазерная цементация быстрорежущей стали не приводит к повышению красностойкости.  
Структуру цементационного слоя можно регулировать за счёт энергии импульса и толщины графитовой обмазки.

## Лазерное азотирование

В качестве азотированной среды используется: струя N<sub>2</sub> под давлением, NH<sub>3</sub> или паста на основе карбамида (CO(NH<sub>2</sub>)).

При оплавлении в структуре преобладает азотистый мартенсит с высокой твёрдостью.

При лазерном азотировании без оплавления на поверхности образуется неоднородная аустенитная структура.

# Изменение химического состава поверхностного слоя (лазерное легирование)

*Способы ввода элементов в зону лазерного воздействия:*

*нанесение порошка на поверхность;*

- обмазка поверхности пастой;
- накаливание фольги;
- легирование в жидкой фазе (в воде, глицерине);
- легирование в газовой среде (в стеклянной ёмкости);
- удержание легирующего элемента магнитным полем (ферромагнитные порошки);
- электроискровое нанесение;
- электролитическое покрытие;
- детонационное покрытие.

*Недостатки:* трудно контролировать глубину, порошок сдувается.

# Лазерная обработка чугунов

- Проводится с оплавлением поверхности, приводит к растворению графита в расплаве, из-за чего образуется отбеленный чугун.
- Кристаллизация – при высоких скоростях охлаждения, поэтому в структуре отбеленного чугуна наблюдается выравнивание концентрации кремния. Эта структура – мелкие дендриты или ячейки аустенита, в междендритных промежутках – ледебурит.
- Особенность ледебурита – почти полностью состоит из цементита, т.е. кристаллизация осуществляется по механизму, близкому к квазиэвтектическому.
- Высокая твёрдость: 8000-10000 мПа для **ВЧ 60**;
- 6000-9450 для **ВЧ 50**;
- 7400-9000 для **СЧ 24**;
- 6000-8000 для **КЧ 35-40**.

- Граница между зоной оплавления и зоной термического влияния в чугунах является неровной из-за «контактного плавления» - пересыщения углеродом металлической матрицы около графитовых включений и понижения температуры плавления согласно диаграммы Fe – Fe<sub>3</sub>C.
- Степень насыщения углеродом на различных расстояниях от графитовых включений различна.  
*Структура: рядом с графитом слой из цементита, далее пластинчатый ледебурит, ледебурит + аустенит, однородный аустенит и следовательно аустенит + мартенсит игольчатый.*

*Микротвёрдость слоёв различна:*

- 6400 – 6700 мПа для аустенита и А+М;
- 10000 – 12000 мПа для цементитной и ледебуритной структуры.
- В нижней части зоны температура влияния насыщения матрицы из графита незначительна, структура состоит из мартенсита и аустенита остаточного.

# Особенности фазовых превращений в металлах и сплавах при лазерной обработке

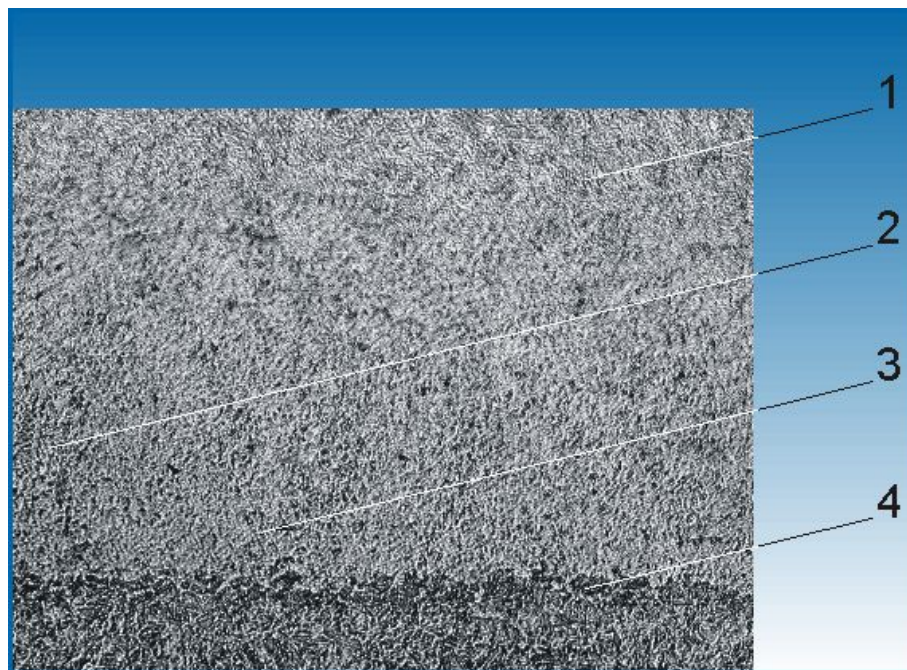
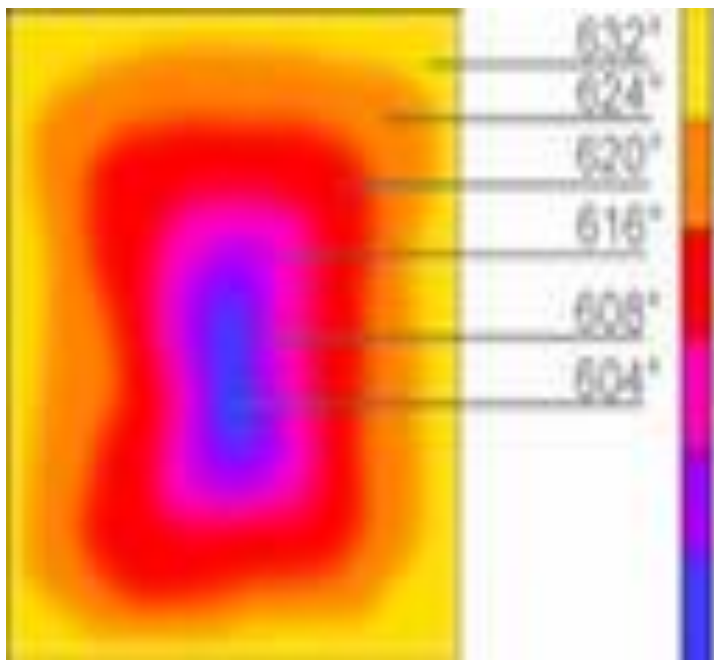
Быстрый нагрев приводит к получению высокотемпературной фазы с мелким зерном (сталь не охрупчивается), изменяется механизм фазовых превращений (чаще всего реализуются бездиффузионные превращения).

Бездиффузионному образованию новой фазы присущи особенности:

- происходит без изменения состава;
- распространяется на широкую область температур (температура начала превращения не зависит от скорости нагрева и охлаждения);
- кристаллические решетки превращающихся фаз закономерно ориентированы друг относительно друга.
- чаще всего происходит мартенситное превращение. При быстром нагреве сталей образование высокотемпературной фазы аустенита может иметь бездиффузионный характер.
- Исходная структура стали оказывает большое влияние на кинетику растворения избыточных фаз в аустените и его гомогенизации. Крупные карбиды могут сохраняться в аустените до самого плавления материала.
- при лазерном нагреве растворы после растворения избыточных фаз могут быть чрезвычайно неоднородны по химическому составу.
- при очень быстром охлаждении расплавленного металла возможно его переохлаждение без кристаллизации (аморфное состояние (в практике аморфизация нашла широкое применение (высокая прочность, износостойкость)).

## Фазовые превращения при лазерной закалке

- Механизм образования аустенита при лазерном нагреве зависит от исходной структуры стали.
- Поэтому при нагреве доэвтектоидных сталей с феррито-перлитной структурой образовывалась неоднородная структура, состоящая из участков высокоуглеродистого мартенсита и участков малоуглеродистого феррита. Эти два типа участков очень сильно различались по твердости. Это различие сохранялось вплоть до температур плавления, по этой причине стали с феррито-перлитной структурой не подвергаются лазерной закалке



- При лазерном нагреве сталей с мартенситной или бейнитной структурой происходит ориентированное образование аустенита, сопровождающееся воспроизведением величины, формы и ориентации первоначальных зерен аустенита. Этот эффект структурной наследственности проявляется при лазерном нагреве более широко, чем при обычном нагреве. В связи с этим формируется более однородная структура стали и твердость закаленной стали практически одинакова по всей зоне воздействия лазерного пучка.

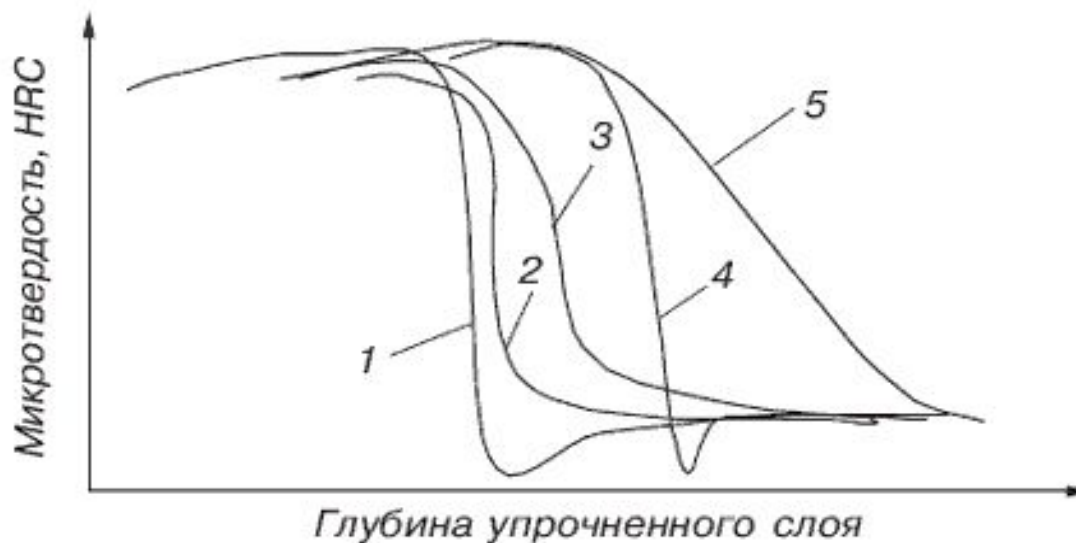


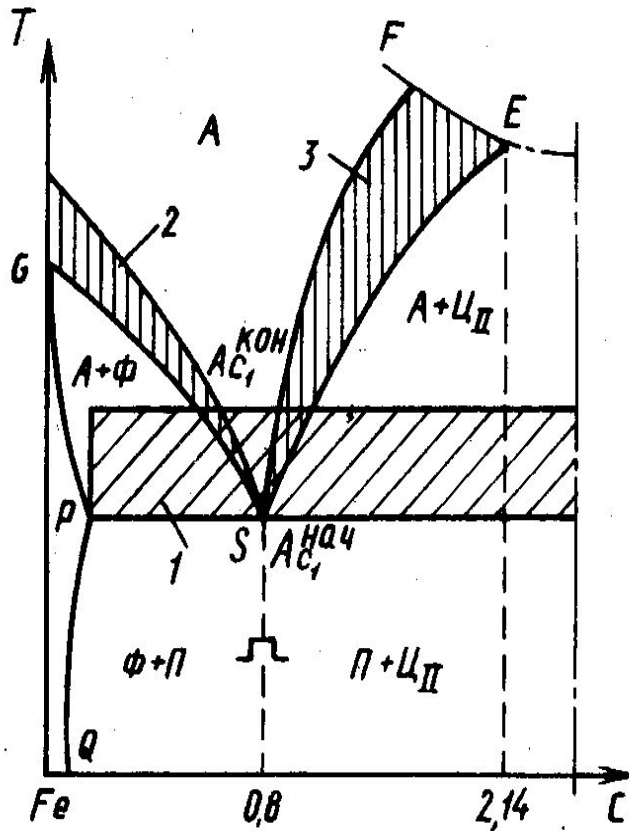
Схема изменения микротвердости сталей по глубине зоны лазерного воздействия при обработке в эгалитарных режимах:

1 — У10А; 2 — У10АГ; 3 — 9ХФМ; 4 — 8Н1А; 5 — 7Н2МФА



# Особенности термообработки лазерным лучом

- Сосредоточение значительной энергии на малой площади поверхности, что приводит к нагреву со сверхскоростью  $10^6$  гр/с;
- За счёт большого градиента температур и высокой теплопроводности металла скорость охлаждения достигает  $\sim 10^4 \dots 10^6$  гр/с. В результате происходит автозакалка;
- Высокие температурные градиенты способны вызывать образование дефектов (дислокации, вакансии);
- Вызывают высокие упругие деформации и связанные с ними напряжения;
- Высокие скорости нагрева применяют кинетику фазовых превращений и растворения фаз;
- Возможна реализация бездиффузионных превращений при нагреве;
- Имеются доказательства того, что превращение протекает сдвиговым путём;
- При охлаждении с высокой скоростью исключается протекание самоотпуска мартенсита;
- Мартенсит после лазерной термообработки обладает более высокой прочностью и способностью к интенсивному деформационному упрочнению;
- Неотпущенный мартенсит проявляет способность к интенсивному закреплению дислокаций растворёнными атомами углерода, в результате – повышение прочности и износостойкости.



- На этапе нагрева лазером происходит формирование структуры аустенит, при снижении температуры- образование мартенсита. Подводимая тепловая энергия выше энергии, необходимой для перестройки решетки. Перестройка решетки идет с конечной скоростью. Превращение проходит не изотермически, а в интервале температур  $A_{c1\text{ кон}} - A_{c1\text{ нач}}$ .
- Из-за высокой скорости нагрева диффузионные процессы перестройки решетки ОЦК в ГЦК смещаются в область более высоких температур и не заканчиваются на линии GS. Линия SE также смещается и происходит микроплавление границы цементита с аустенитом.
- Аустенит неоднороден, т.к. карбиды растворяются при более высокой температуре.
- Неоднозначны вопросы о размере зерна аустенита. С одной стороны, увеличение скорости нагрева способствует измельчению зерна. С другой, процесс формирования аустенита осложняется эффектами восстановления формы и размеров зерна. После завершения фазовых превращений в процессе дальнейшего нагрева и охлаждения происходит рост зерна аустенита, хотя его росту препятствуют карбиды, которые сохраняются до высоких температур. В этих условиях размер зерна зависит от соотношения температуры нагрева и времени выдержки при этой температуре.
- За малое время воздействия лазерного луча не успевает произойти укрупнение зерна как при длительном нагреве.
- Чтобы получить более глубокий слой лазерный нагрев осуществляется до более высоких температур (нагрев с оплавлением). Микротвердость сталей после лазерного термоупрочнения выше, чем после обычной термообработки на 2000 МПа.