

**Основные параметры лазерной закалки  
непрерывными лазерами и характеристики  
упрочненной поверхности**

Лазерная закалка непрерывными лазерами имеет ряд достоинств по сравнению с импульсной.

**Во-первых**, нет ограничений по длительности лазерного воздействия. Это позволяет увеличить производительность процесса и геометрические размеры упрочненных зон, а **также** в более широком интервале изменять структуру и свойства ЗЛВ, в частности, полнее осуществлять процесс гомогенизации аустенита при нагреве стали.

**Во-вторых**, по длине упрочненных полос отсутствуют зоны **многократного** нагрева, а следовательно, **имеется** возможность увеличения равномерности свойств по поверхности.

**Основными параметрами лазерной закалки непрерывными лазерами являются** мощность излучения  $P$  и диаметр пятна  $d_n$  **которые** определяют плотность мощности. Кроме того, к ним относится скорость перемещения детали относительно луча, от которой зависит длительность **лазерного** воздействия.

Зона упрочнения на поверхности детали имеет форму полосы, а сечение, перпендикулярное движению лазерного луча

### Микротвердость

поверхностного слоя зависит от режимов обработки и **химического состава** сплава. При обработке с оплавлением среднеуглеродистой стали и ряда сплавов с увеличением скорости обработки микротвердость повышается. Это связано с увеличением скорости охлаждения. С повышением содержания углерода или легирующих элементов в стали микротвердость при увеличении скорости обработки возрастает не так заметно, поскольку при этом может повышаться количество остаточного аустенита. При обработке без оплавления из-за незавершенности процессов гомогенизации микротвердость может уменьшаться.

## Параметры шероховатости поверхности

при обработке с оплавлением имеют сложную зависимость от режимов. При большом объеме расплавленного металла (обработка с большой мощностью) с уменьшением скорости обработки высота микронеровностей и максимальная высота наплывов за счет увеличения растекаемости расплава и смачиваемости поверхности уменьшаются.

В случае малого объема расплавленного металла (обработка с малой мощностью) с увеличением скорости обработки высота наплывов увеличивается.

При переходе на режим лазерной закалки без оплавления параметры шероховатости поверхности практически равны исходным.

Перспективным направлением для уменьшения шероховатости при лазерной закалке с оплавлением может быть разработка процесса с использованием добавок, уменьшающих поверхностное натяжение расплава и увеличивающих смачиваемость поверхности.

***Технологические схемы закалки  
непрерывными лазерами***

При обработке больших поверхностей непрерывными лазерами наиболее широко используют два вида последовательного наложения упрочненных полос: обработка плоских поверхностей и обработка цилиндрических поверхностей.

В данном случае важной характеристикой является коэффициент перекрытия  $K_p$ , определяемый отношением  $K_p = S/dn_{...}$ . Полосы могут быть

наложены с перекрытием (при  $K_p < 1$ ) и без перекрытия (при  $K_p > 1$ ). Тогда к характеристикам упрочнения необходимо добавить равномерность глубины  $h_{min}/h_{max}$  и долю неупрочненной части поверхности  $b_{ну}/b_y$

Следует отметить, что при непрерывной закалке из-за значительного теплового влияния при наложении полосы на предыдущую полосу значение  $K_p$  лишь немного меньше единицы.

Во многих случаях упрочненные полосы расположены на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы обработанная лазером площадь составляла 20...50 % от общей площади. Это позволяет достичь наибольшей износостойкости.

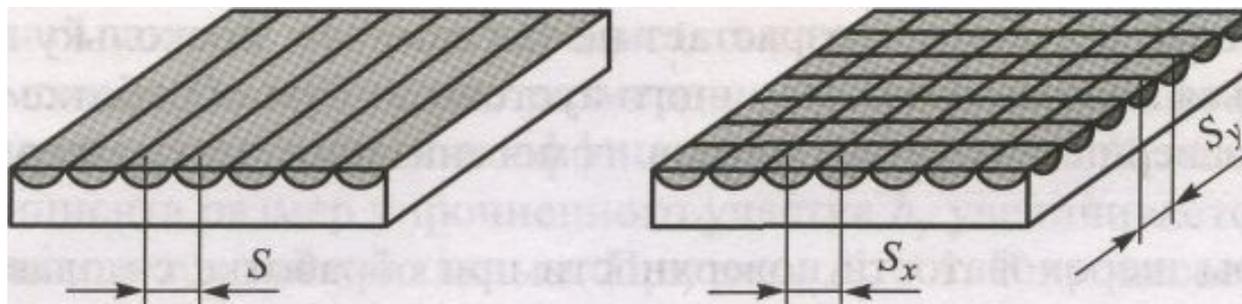


Рис. 4.44. Схемы наложения полос на плоской поверхности

Обработку плоских поверхностей осуществляют по двум схемам наложения полос: линейной (рис. 4.44, а) и клеточной (рис. 4.44, б). После наложения каждой полосы деталь или луч периодически смещают в поперечном направлении на расстояние, равное шагу  $S$ . При использовании клеточной схемы наиболее просто полосы накладывают под прямым углом друг к другу и с одинаковым шагом по обеим координатам, хотя больших сложностей в случае наложения полос не под прямым углом и для упрочнения при  $S_x \neq S_y$  не возникает.

Обработку цилиндрических поверхностей осуществляют по трем схемам: наложение односпиральных полос (рис. 4.45, а), наложение двух спиральных полос навстречу друг другу (4.45, б) с постоянной осевой подачей  $S$ , а также наложение полос вдоль оси по образующей с периодическим вращением детали для смещения на шаг  $S$  (4.45, в).

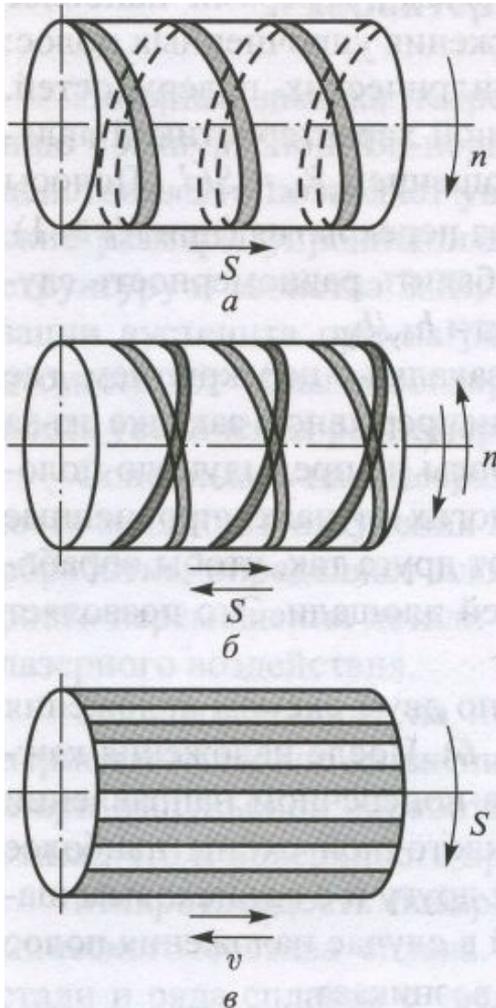
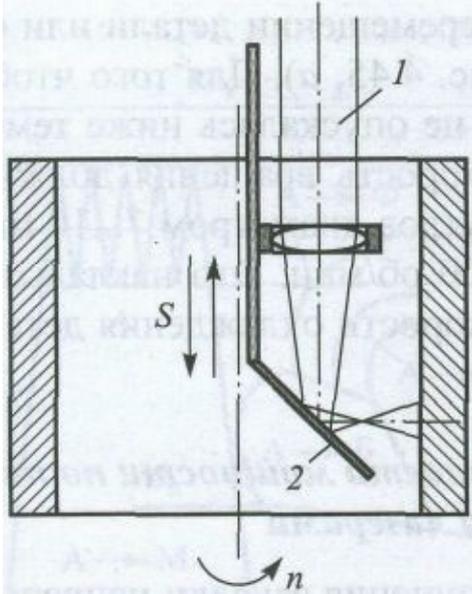


Рис 4.45 Схемы упрочнения цилиндрических деталей



. По этим же схемам производят упрочнение внутренних цилиндрических поверхностей. Упрочнение внутренних поверхностей втулок и других деталей осуществляют с помощью отклоняющего зеркала, вводимого внутрь детали (рис. 4.46). В этом случае возникает необходимость охлаждения и защиты зеркала от испарений и копоти. При получении спиральных полос для достижения заданной линейной скорости обработки  $v$  втулку вращают непрерывно с частотой  $n$  с одновременным перемещением в продольном направлении с подачей  $S$ .

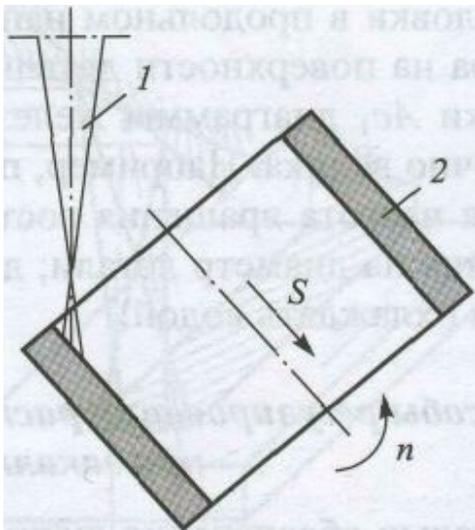


Рис.4.46. Схема упрочнения внутренней цилиндрической поверхности:

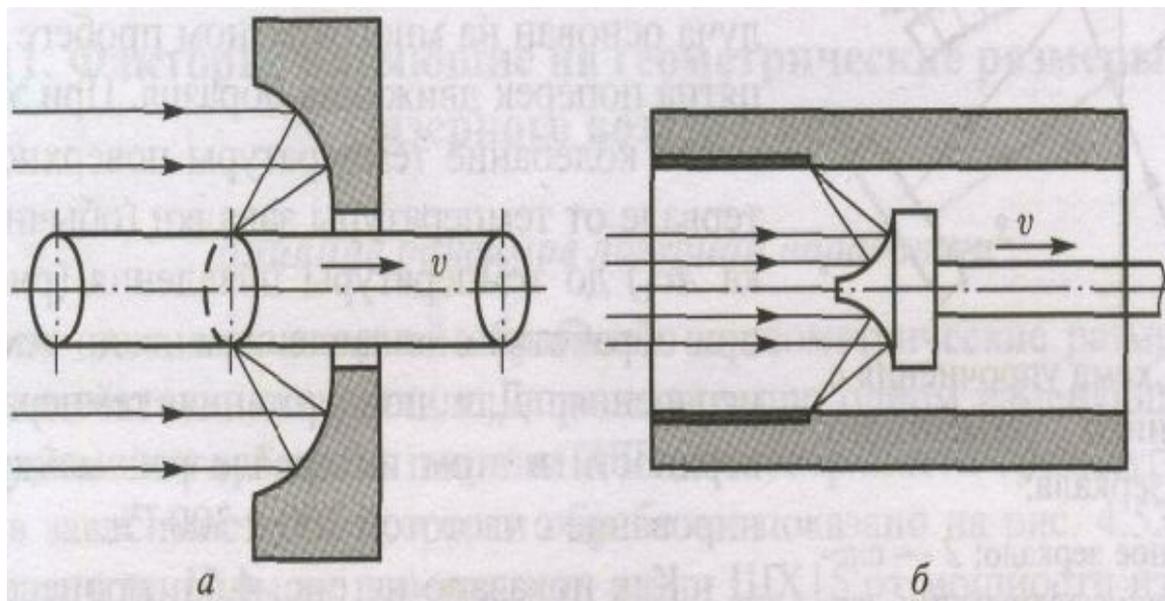
1 – луч зеркала; 2 – зеркало.

Рис. 4.47 Схема упрочнения внутренней поверхности цилиндра лучом, направленным под углом к оси втулки: 1 – луч лазера; 2 – деталь.

Обработка непрерывным излучением позволяет повысить однородность микроструктуры и твердости вдоль полос упрочнения, однако поперек полос неоднородность все же имеет место

Для уменьшения их размеров существует ряд рекомендаций. Во-первых, предпочтительнее обработка при больших скоростях с высокими градиентами температуры. Во-вторых, периферийную часть лазерного пятна с невысокой плотностью мощности рекомендуется отсекают. С учетом этого наиболее целесообразным для термоупрочнения является равномерное распределение плотности мощности по пятну или плотности мощности в центре пятна на 20...30 % меньше по сравнению с таковыми в периферийных участках.

Существует два метода упрочнения цилиндрических деталей без образования зон отпуска. Схемы первого метода применительно к наружным и внутренним поверхностям показаны на рис. 4.48, а и б. Метод достаточно сложен и заключается в направлении кольцевого луча на коническое или параболическое зеркало, которое отклоняет и фокусирует излучение в виде кольца по всему диаметру обрабатываемой детали. Деталь перемещают в продольном направлении со скоростью  $v$

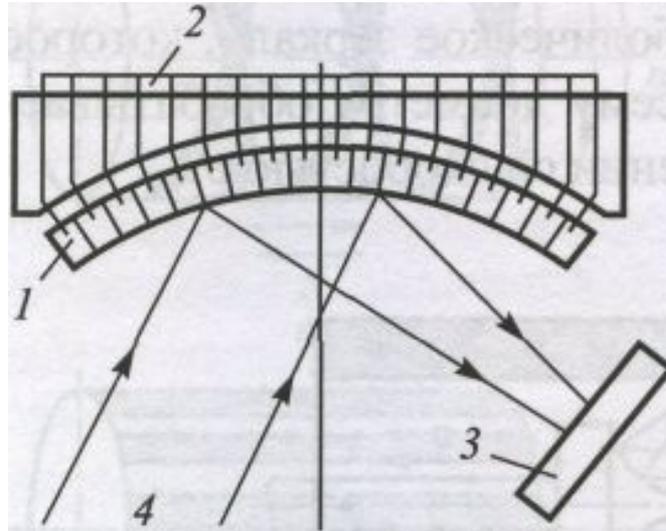


**Рис. 4.48.** Упрочнение наружных (а) и внутренних (б) цилиндрических поверхностей с помощью параболических зеркал

Второй метод заключается во вращении и перемещении детали или оптической головки в продольном направлении (см. рис. 4.45, а). Для того чтобы температура на поверхности детали за один оборот не опускалась ниже температуры точки  $A_c$  диаграммы железо — углерод, скорость вращения должна быть достаточно велика. Например, при обработке прутков диаметром 7...10 мм необходимая частота вращения составляет 2800...3000 об/мин. Это накладывает ограничения на диаметр детали; для увеличения скорости охлаждения деталь приходится охлаждать водой.

## ***Способы регулирования распределения плотности мощности по пятну при закалке непрерывными лазерами***

С целью обеспечения лучшего качества упрочнения закалку непрерывными и импульсными лазерами осуществляют в расходящемся пучке (см. рис. 4.38). Размеры пятна подбирают изменением степени расфокусировки. Однако при большой расфокусировке неоднородность плотности мощности по пятну увеличивается. Это приводит к неравномерности глубины ЗЛВ, уменьшению геометрических размеров ЗЛВ при обработке без оплавления, увеличению ширины зон отпуска при обработке с перекрытием и т. д. Для увеличения равномерности плотности мощности или для формирования заданного распределения возможно применение сегментных и гибких фокусирующих зеркал. Как показано на рис. 4.49, сегментное зеркало состоит из множества отдельных элементов, которые могут изменять свое положение, в результате чего на поверхности детали формируется заданное распределение плотности мощности. Гибкие зеркала чаще всего выполнены из листовой меди толщиной 1...2 мм. Заданное распределение плотности мощности на обрабатываемой детали обеспечивается местной деформацией распределенных участков зеркала.

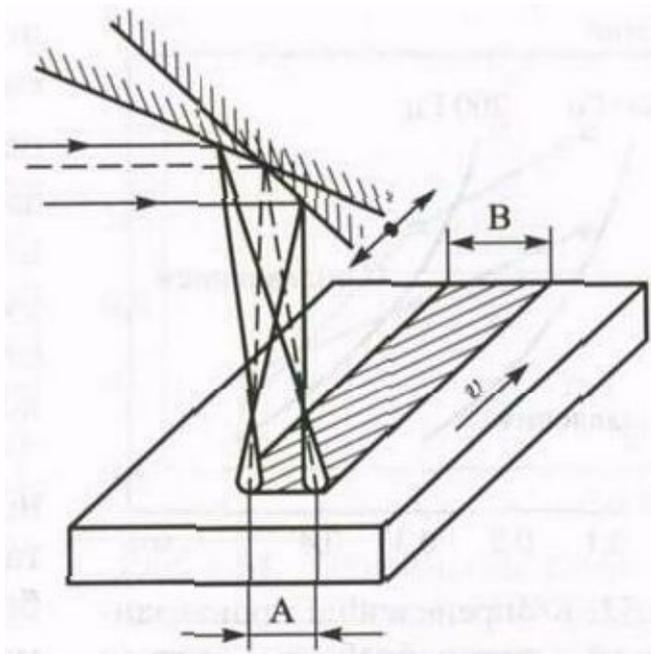


**Рис. 4.49.** Схема упрочнения с использованием сегментного зеркала: 1 — сегментное зеркало; 2 — система управления элементами зеркала; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — луч лазера

Повысить равномерность плотности мощности или получить ее заданное распределение, увеличив геометрические размеры ЗЛВ и относительную ширину упрочненных зон и уменьшив долю зон отпуска на поверхности, можно сканированием.

### ***Принцип сканирования***

луча основан на многократном пробеге лазерного пятна поперек движения образца. При этом имеет место колебание температуры поверхности в интервале от температуры закалки (обычно это точка  $A_{c1}$  до температуры плавления (рис. 4.50), а при обработке с оплавлением — до температуры испарения. Для поддержания температуры поверхности в этом интервале рекомендуется сканирование с частотой 200 и 300 Гц.



**Рис. 4.51. Схема** закалки со сканированием луча путем колебания зеркала

Как показано на рис., процесс обработки со сканированием характеризуется амплитудой сканирования **A**. Для описания процесса введен такой параметр, как производительность термообработки **П**, который равен произведению ширины упрочненной полосы **B** на скорость относительного перемещения **v**, т. е.

$$П = B v.$$

## **Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия**

Влияние режимов лазерной обработки на геометрические размеры зон лазерного воздействия, как правило, определяют при одном изменяющемся параметре. Это определяется экспериментально. Установлено, что с увеличением скорости обработки размеры ЗЛВ уменьшаются, а при повышении мощности — увеличиваются.

Согласно экспериментальным данным и теоретическим расчетам, максимальная глубина упрочненного без оплавления слоя на сталях не превышает 2,5...3,0 мм, а на чугунах — 2,0...2,5 мм. При обработке с оплавлением эти значения могут быть выше.

Поскольку существует узкий диапазон режимов получения сравнительно глубоких зон лазерного воздействия без оплавления поверхности, особое внимание следует уделять мерам, повышающим эффективность процесса. Улучшение условий фокусировки и оптимизация режимов могут привести к значительному увеличению глубины закалки без оплавления.

### ***Влияние химического состава***

С повышением содержания углерода в стали от 0,45 до 1,0 % глубина зоны оплавления несколько увеличивается, что может быть обусловлено снижением температуры плавления.

Введение в среднеуглеродистую сталь 13 %-ного хрома приводит к заметному уменьшению глубины ЗЛВ. Та же закономерность наблюдается при введении 1 %-ного хрома в высокоуглеродистую сталь ШХ15.

Присутствие в стали хрома в количестве, достаточном для образования специальных карбидов, также приводит к уменьшению глубины ЗЛВ, что свидетельствует о замедлении аустенитизации при нагреве. Так, в сталях 40X13 и ШХ15 при легировании хромом цементита и формировании спецкарбидов  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение при лазерном нагреве замедляется. Кроме того, с увеличением количества легирующих элементов в стали ее теплопроводность заметно снижается.

## **Влияние типа поглощающих покрытий и состояния поверхности**

Известны три класса покрытий, обладающих достаточно высоким коэффициентом поглощения (не менее 0,6) и хорошо наносящихся на сталь: на основе оксидов *Al* и *Zn*; углерода и на основе химических соединений. Состав покрытий и рекомендуемая толщина  $\delta$  нанесения приведены ниже:

1. Водный раствор 2пО .....	25 мм
2. Голубая цинковая гуашь .....	10
3. 2пО, органическая связка, пластификатор — грунтовка черная ..	10 -30
4. $Al_2O_3$ , органическая связка, пластификатор — грунтовка черная ..	40-60
5. Аэрозольный графит — твердая смазка .....	15 -25
6. Водный раствор сажи А56 .....	25.....
7. Коллоидный раствор графита в ацетоне, связка — бакелит .....	50
8. Сульфиды .....	1...2
9. Черный гальванический хром .....	2
10. Фосфат марганца.....	5...10 мм

При прочих равных условиях глубина ЗЛВ в случае применения различных поглощающих покрытий может отличаться в несколько раз.

Нанесение на поверхность различных поглощающих покрытий приводит к изменению глубины ЗЛВ. Наибольшее различие наблюдается при малых плотностях мощности и больших скоростях обработки, т. е. при невысоких температурах нагрева. Наилучшими свойствами обладают покрытия, в состав которых входят оксиды цинка или алюминия с добавками пластификаторов и органической связки.

## **Свойства сплавов после лазерной закалки**

Использование лазерного упрочнения позволяет обеспечить улучшение многих эксплуатационных показателей, а именно износостойкости, теплостойкости, остаточных напряжений в упрочненном слое, механических характеристик, коррозионной стойкости и др.

### ***Износостойкость сплавов, упрочненных лазером***

Использование лазерной закалки позволяет повысить износостойкость пар трения, работающих как в условиях сухого трения, так и в абразивно-масляной среде.

### ***Распределение остаточных напряжений***

В материале, упрочненном лазерным излучением, возникают остаточные напряжения. Их величина и знак зависят от режимов лазерной обработки, химического состава материала и некоторых других факторов. Они определяют такие свойства изделий, как износостойкость, усталостные характеристики, остаточные деформации и т. д.

## ***Деформации и поводки после лазерной закалки***

На деформацию сталей после лазерной закалки оказывают влияние много факторов. В зависимости от соотношения толщины и длины обрабатываемого материала, а также глубины ЗЛВ величина и знак деформации изменяются. Например, при импульсной закалке с увеличением глубины ЗЛВ от 90 до 140 мкм в образцах толщиной 3 мм из стали 45 прогиб свободного конца образца возрастает от 1,1 до 1,6 мм. Причем в этом случае может иметь место прогиб стальных образцов выпуклостью навстречу лазерному лучу при толщине образцов до нескольких сотен микрометров, а также вогнутостью навстречу лазерному лучу при большей толщине образцов.

Особенно существенные поводки наблюдаются при лазерной закалке непрерывными СО<sub>2</sub>-лазерами длиномерных деталей для получения упрочненного слоя глубиной 1 мм и более. Например, при наложении на широкую сторону бруса из чугуна поперечным сечением 50X120 мм и длиной 1800...2250 мм восьми продольных полос шириной 16 мм и глубиной 1 мм прогиб центральной части бруса относительно краев составлял 2...3 мм.

Брус деформировался вогнутостью навстречу лазерному лучу, что свидетельствует о преобладании пластических остаточных деформаций укорочения в поверхностных слоях. Еще большие остаточные деформации имеют место при таких же режимах обработки брусьев из среднеуглеродистых сталей.

## Примеры поверхностной лазерной обработки

Технология лазерной наплавки позволяет восстанавливать изношенные детали. При этом восстанавливаемые детали, например, коленчатые валы большегрузных автомобилей имеют ресурс работы нового коленчатого вала, а стоимость восстановления методом лазерной наплавки коленвала составляет 30-40% от стоимости нового коленвала.

Технология лазерной наплавки позволяет заменить классическую химико-термическую технологию азотирования, борирования, цементации, нироцементации. При этом резко сокращается длительность технологического цикла изготовления, снижается себестоимость изготовления, улучшается экология производства.

Некоторые примеры применения технологии лазерной наплавки.





Закалка колец подшипников

Сталь 55СМ5ФА. Параметры обработки: Мощность лазерного излучения 2,8кВт Скорость 1,8м/мин Диаметр фокусного пятна 11мм



Гильза больших размеров.

Процесс лазерной закалки гильзы цилиндра турбокомпрессорного дизельного двигателя локомотива ведут наложением спиральной полосы шириной 3...4мм через 1...1,5мм при мощности излучения 5кВт в течение 15минут. Глубина зоны упрочнения достигает 1мм, износостойкость увеличивается в три раза.

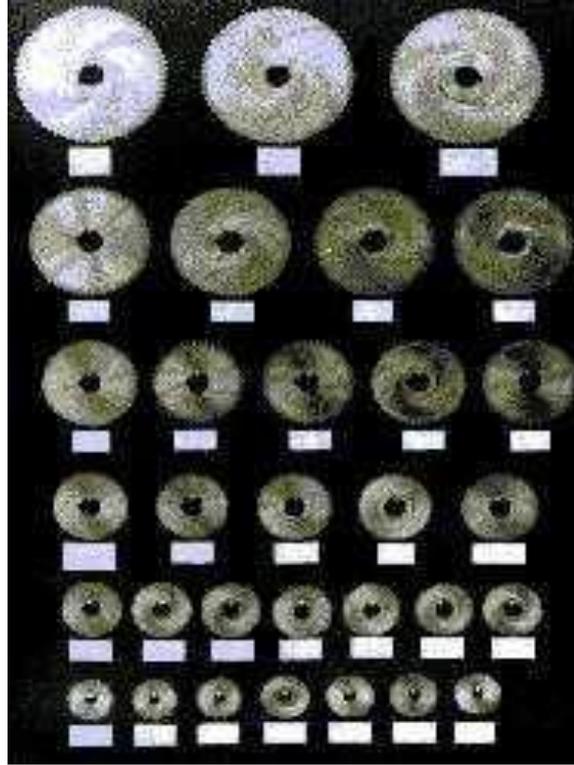


Термообработка ножей

Промышленный нож для мясорубки. Термообработка режущих кромок позволяет уменьшить количество заточек. Т.к. твёрдость кромки повышается в несколько раз.



Восстановление изношенных крестовин локомотивов железнодорожного транспорта методом лазерной наплавки.



## Инструментальное производство

Разработана технология лазерной закалки отрезных, прорезных фрез из быстрорежущих (инструментальных) сталей с целью повышения их стойкости до 10 раз. Лазерная закалка позволяет уменьшить налипание на фрезу (адгезионное схватывание) особенно при обработке цветных сплавов, увеличить скорость резания.

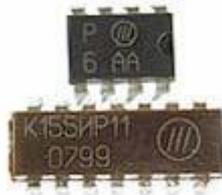
## Лазерная гравировка



Сложность наносимого гравировкой изображения может быть любой, вплоть до полутоновых фотографических изображений и штрих-кодов, а созданное лазером изображение воспроизводится на изделии за несколько секунд.

Лазерная гравировка выполняется на самых разнообразных материалах: металл, пластик, дерево, кожа, стекло, оргстекло, акрил, камень, бумага и прочее, а также на многослойных, покрытых и окрашенных поверхностях. Процесс лазерной гравировки максимально автоматизирован и не имеет промежуточных технологических этапов между компьютерной версткой и конечным изделием. Весь процесс гравировки происходит при полном отсутствии ручных процессов, что позволяет максимально снизить количество ошибок в технологическом процессе и свести время производства готового изделия до рекордных значений в 10-15 минут, а время гравировки готового изделия - до 0,3 минут. Отсканированные картинки, фото, клипарты, чертежи, и многое другое может использоваться для "печати" лазером. Лазер гравировает и режет такие материалы как дерево, оргстекло, пластик, кожа и много других неметаллических материалов.

## Лазерная маркировка промышленных изделий



Метод лазерной гравировки позволяет наносить на изделия промышленного производства любую, даже мелкую, информацию: логотип и название производителя, технические данные, сквозную нумерацию и штрих-код продукции, выходные параметры изделия, название детали и др.

Лазерная маркировка является одним из самых надёжных способов защиты продукции от подделки. Быстрота процесса, сконцентрированная мощность воздействия, высокое качество прорисовки, простота применения, нестираемость изображения - качества, делающие лазерную маркировку привлекательной для современных производителей.

А бесконтактность нанесения имеет огромное значение для изделий с повышенными требованиями к точности, хрупких, нежестких деталей, не допускающих ударного клеймения

Примеры использования лазерной гравировки и маркировки:

- \* лазерная гравировка резцов, метчиков, сверл и другого инструмента из высокопрочных закаленных сталей или твердых сплавов;
- \* нанесение шкал и нониусов;
- \* лазерная маркировка подшипников, медицинского инструмента, различных ответственных деталей.
- \* лазерная гравировка электронных компонентов: чипов, кабелей, разъемов;
- \* глубокая лазерная маркировка на штампах, пресс-формах.