

2. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

При воздействии электронного луча на поверхность материала кинетическая энергия электронов переходит в тепловую с выделением такого большого количества тепла, что материал плавится. Этот эффект давно уже используется для электронно-лучевой сварки и резки. Позднее была показана возможность эффективного использования электронно-лучевого нагрева для поверхностной закалки, а также применения расфокусированного электронного луча для локального (зонального) отжига, в частности, сварных соединений.

Электронно-лучевые установки дешевле лазерных, обладают большей мощностью, отличаются более высокой степенью использования энергии луча для нагрева металла (к.п. д. доходит до 75%).

Наиболее целесообразные области термической обработки с применением электронно-лучевого нагрева: а) локальная (местная) термическая обработка расфокусированным электронным лучом с целью снятия остаточных напряжений, местного разупрочнения или местной закалки; б) поверхностное упрочнение, возникающее как результат быстрого нагрева и фазовых (структурных) превращений при сверхбыстром охлаждении; в) поверхностное легирование, основанное на тех же принципах, что и лазерное поверхностное легирование.

Как и при лазерной термической обработке, нагрев электронным лучом может проводиться в виде пересекающихся полос или непересекающихся (с перекрытием или без него) полос, в режиме сканирования.

2.1. Оборудование для обработки с нагревом электронным лучом

Электронный луч получают с помощью электронной пушки, которая представляет собой прибор, позволяющий получать узкие пучки электронов с большой плотностью энергии (рис. 18). В этой установке катод пушки нагревается до высокой температуры и эмитирует электроны. Между катодом и анодом создается большая разность потенциалов (в несколько десятков тысяч вольт). Поэтому электроны на пути от катода к аноду приобретают значительную кинетическую энергию и разгоняются до огромных скоростей. Электроны сжимаются в пучок с помощью прикатодного электрода. Катод, прикатодный электрод и анод (ускоряющий электрод) образуют прожектор, назначение которого состоит в первичном формировании сходящегося пучка электронов. Далее пучок дополнительно сжимают

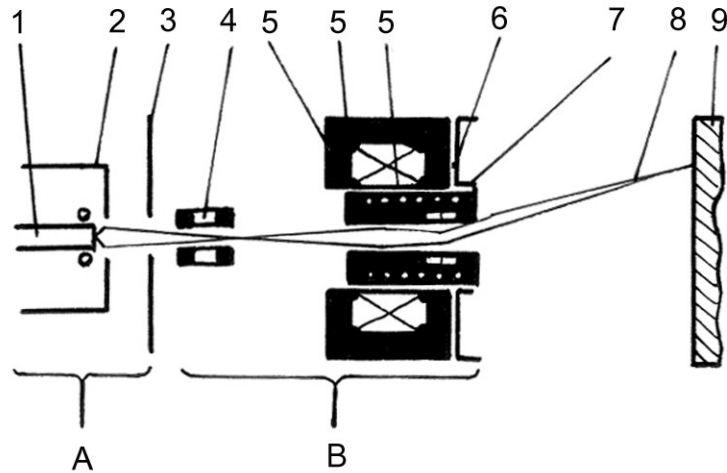


Рис. 18. Схема электронно-лучевой установки: А – Электронная пушка; В – система управления лучом; 1 – катод, 2 – контрольный электрод, 3 – анод, 4 – центрирующая система, 5 – фокусирующие линзы, 6 – система отклонения луча, 7 – коллектор электронов обратного рассеяния, 8 – электронный луч, 9 – деталь (образец).

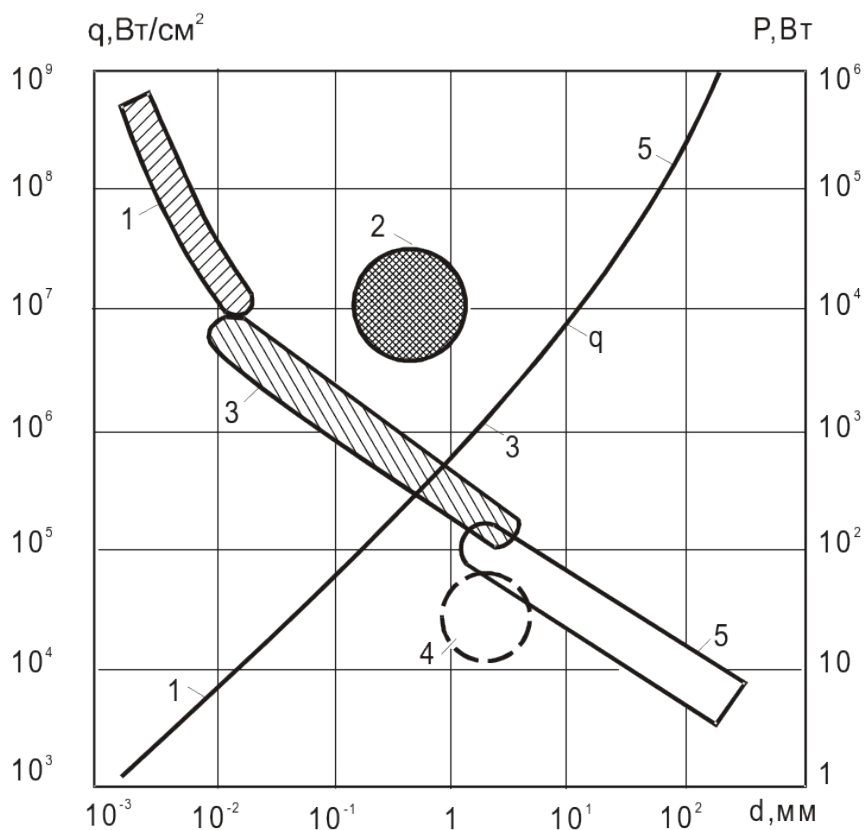


Рис. 19. Энергетические параметры электронно-лучевого воздействия (мощность P , удельная мощность q , диаметр электронного луча d) при различного рода технологических воздействиях: 1 – получение отверстий и пазов, 2 – испарение, 3 – сварка, 4 – плавка, 5 – термическая обработка.

(фокусируют) фокусирующими электромагнитными линзами с целью повышения плотности энергии в сечении пучка при встрече его с поверхностью обрабатываемого металла.

В электронных пушках, предназначенных для электронно-лучевой сварки, кроме этого предусмотрена магнитная отклоняющая система, которая позволяет проводить корректировку положения луча относительно свариваемых деталей. Эта система выполняет и ряд других функций. Она может расщеплять электронный луч на несколько пучков для одновременной сварки нескольких швов или для предварительного, сопутствующего или последующего за сваркой нагрева. С помощью этой системы, в частности, в едином технологическом процессе можно совместить электронно-лучевую сварку и отжиг сварного соединения для снятия остаточных напряжений непосредственно после сварки. В электронно-лучевых установках, предназначенных для термической обработки, отклоняющая система позволяет осуществлять колебание электронного луча в направлении, перпендикулярном перемещению детали. Для управления электронным лучом в широких пределах нашли применение электромагнитные приборы ПУЛы (приборы управления лучом).

Электронно-лучевые установки были разработаны применительно к проблемам сварки и резки. Тем не менее, некоторые из них, в частности, не слишком мощные, можно использовать и для нагрева при термической обработке. По степени защиты нагреваемого объекта от взаимодействия с газами электронно-лучевые установки делят на три класса: а) высоковакуумные установки с рабочим остаточным давлением $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па и ниже; б) установки промежуточного вакуума ($1 \div 10$ Па); в) установки для вневакуумной обработки и сварки. По уровню ускоряющего напряжения различают низковольтные установки ($U=10 \div 30$ кВ); установки со средним значением ускоряющего напряжения ($U=30 \div 60$ кВ) и высоковольтные установки ($U=100 \div 200$ кВ). По мощности электронно-лучевые установки разделяют на три класса: малой, средней и большой мощности.

Электронно-лучевая технология применяется, в основном, в следующих направлениях: плавка и испарение, сварка, нанесение пленок и покрытий, прецизионная обработка, термическая обработка металлов и сплавов. Области применения электронно-лучевых установок для этих целей определяются параметрами электронно-лучевого воздействия: мощностью P , удельной мощностью q , и диаметром электронного луча d (рис. 19).

Для прецизионной обработки деталей (получение отверстий и пазов, резка) используют высоковольтные установки ($80+150$ кВ) небольшой мощности (до 1 кВт) при очень небольшом диаметре электронного луча. В этих условиях формируется тонкий электронный луч с очень высокой плотностью энергии. С увеличением плотности энергии

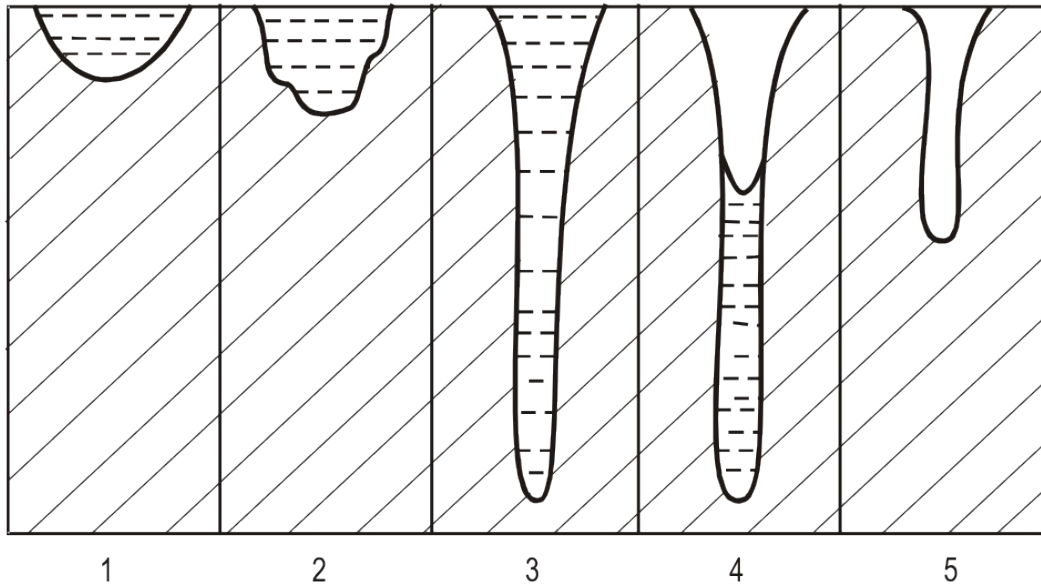


Рис. 20. Схематическое изображение поперечных сечений зон обработки при электронно-лучевом воздействии: 1 – при «мягком» режиме нагрева; 2 – переход к жесткому режиму; 3 – кинжальное проплавление; 4 – переход к отверстию; 5 – отверстие в материале.

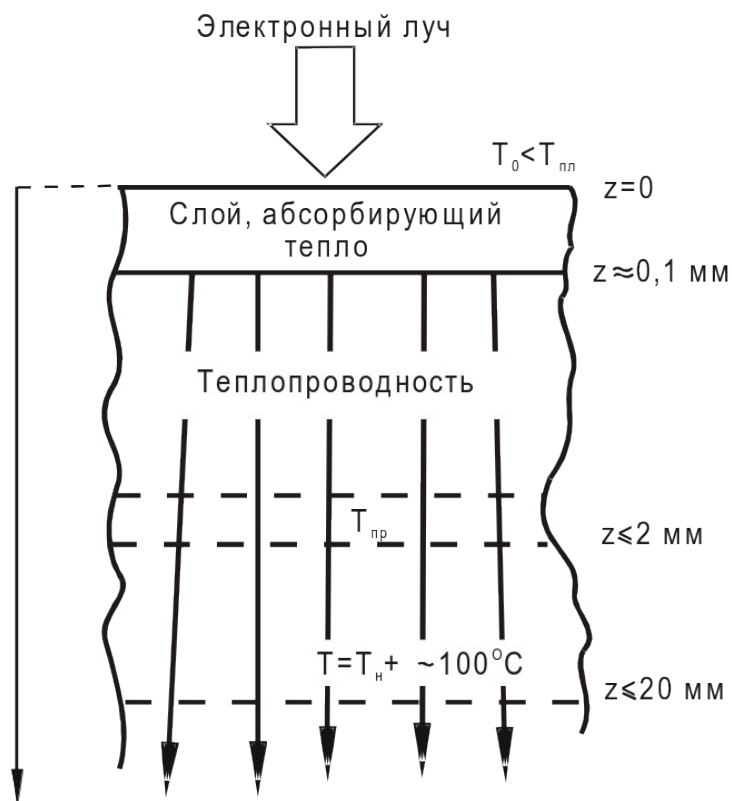


Рис. 21. Схема трансформации энергии электронного луча в тепло в обрабатываемой детали: $T_{пл}$ – температура плавления; T_0 – температура поверхности; $T_{пр}$ – температура превращений; T_n – начальная температура.

электронный луч сначала вызывает плавление металла, затем глубокое (кинжальное) проплавление и, наконец, образование отверстия в обрабатываемом материале (рис. 20).

При испарении в вакууме для нанесения пленок и покрытий используют мощные (до нескольких МВт) электронно-лучевые установки с ускоряющим напряжением $29 \div 30$ кВ. Скорость ввода тепла источником с концентрацией энергии более $10 \div 10$ Вт/см² намного превышает скорость его отвода вглубь металла вследствие теплопроводности, что приводит к поверхностному испарению и вскипанию вещества в объеме, в котором энергия электронного луча преобразуется в тепло.

Для сварки металлов применяют электронно-лучевые установки мощностью $1 \div 120$ кВт и более с ускоряющим напряжением $20 \div 150$ кВ при плотности энергии луча $10^5 \div 10^6$ Вт/см². Для плавки используют мощные электронно-лучевые печи с мощностью до нескольких МВт с ускоряющим напряжением $20 \div 30$ кВ при сравнительно небольшой плотности энергии электронного луча (не более 10^5 Вт/см²).

В настоящее время для термической обработки используют электронно-лучевые установки мощностью до 50 кВт. Магнитным полем электронный луч можно отклонить в определенном интервале углов и направить на поверхность изделия под острым углом (до $25 \div 30^\circ$). Концентрацию мощности при электронно-лучевом нагреве путем различной степени фокусировки луча можно регулировать в пределах от 10^{-2} до 10^5 Вт/см². Для закалки сталей с нагревом электронным лучом обычно применяют электронно-лучевые установки, характеристики которых удовлетворяют следующим требованиям:

- ускоряющее напряжение $U = 60$ кВ;
- мощность луча $P = 1 - 20$ кВт;
- диаметр луча $d = 0,1 - 1$ мм,
- плотность мощности $q = 10^5 - 10^7$ Вт/см²

Недостаток электронно-лучевых установок состоит в необходимости создания вакуума ($10^{-2} \div 10^{-3}$ Па) в рабочей камере, в которой производится термическая обработка. В ряде случаев этот недостаток отсутствует, например, при местном локальном отжиге сварных конструкций, только что сваренных электронно-лучевой сваркой, поскольку вакуум заранее создается перед выполнением электронно-лучевой сварки.

В институте ядерной физики СО АН СССР созданы промышленные ускорители серии ЭДВ, которые успешно используются для электронно-лучевой обработки сталей. Они создают непрерывный концентрированный электронный пучок, выходящий в атмосферу, с плотностью потока энергии $7-10^6$ Вт/см² при мощности до 70 кВт. Энергия электронов в пучке реализуется в пределах $0,8 \div 1,5$ МэВ, что обеспечивает проникновение электронов в сталь на глубину до 0,6 мм.

2.2. Физические и технологические основы термической обработки с применением электронно-лучевого нагрева

Электронный луч – это поток носителей тока, ускоренный в электрическом поле. Параметрами электронного луча являются сила тока луча (I), ускоряющее напряжение (U), сила тока фокусирующей системы (I_f), рабочее расстояние (l) - расстояние от центра фокусирующей системы до поверхности детали и скорость перемещения электронного луча. Диаметр электронного луча (d) возрастает с увеличением силы тока и ускоряющего напряжения. Удельная мощность электронного луча q определяется выражением:

$$q=I \cdot U/(\pi d^2/4) \quad (2)$$

При падении электронного луча на металл (типа железа) энергия луча расходуется следующим образом. Около 25% энергии уходит с отраженными электронами; менее 1% расходуется на рентгеновское излучение, вторичные электроны и термоэмиссию электронов; менее 1% уходит на радиационное излучение и около 73% мощности в поверхностном слое металла преобразуется в тепло (рис. 21). Толщина слоя, в котором кинетическая энергия электронов преобразуется в тепло, возрастает с увеличением ускоряющего напряжения. Для сталей при ускоряющем напряжении 60 кВ толщина этого слоя составляет примерно 10 мкм. Из поверхностного слоя тепло распространяется вглубь металла по механизму теплопроводности. После прекращения подвода энергии от электронного луча поверхностный слой, поглощающий энергию электронов, и поверхностный нагретый слой из-за отвода тепла в объем металла быстро охлаждаются.

При электронно-лучевой плавке мощность луча составляет $1 \div 100$ кВт, а удельная мощность достигает $10^5 \div 10^7$ кВт/см². При термической обработке без расплавления поверхностного слоя используется удельная мощность $10^3 \div 10^5$ кВт/см², что обеспечивает скорость нагрева $10^3 \div 10^4$ (10^5) град/с. Типичные скорости охлаждения составляют $10^3 \div 10^5$ град/с. Распределение температур в нагреваемом стационарным лучом металле описывается линзообразными изотермами (рис. 22).

Области металла, обработанные лучом, могут быть точечными (рис. 23a₁) или линейными (рис. 23b₁). В первом случае луч сначала действует в одной точке, а затем скачком перемещается в другую. Во втором случае луч непрерывно перемещается вдоль детали. Диаметр облученного участка или ширина линии могут быть увеличены расфокусировкой луча. Обработанные лучом пятна или линии могут перекрываться (рис. 23a₂ и b₂), что создает сложную картину термического воздействия, так как последующий нагрев влияет на структуру, сформировавшуюся после предыдущего нагрева. При оп

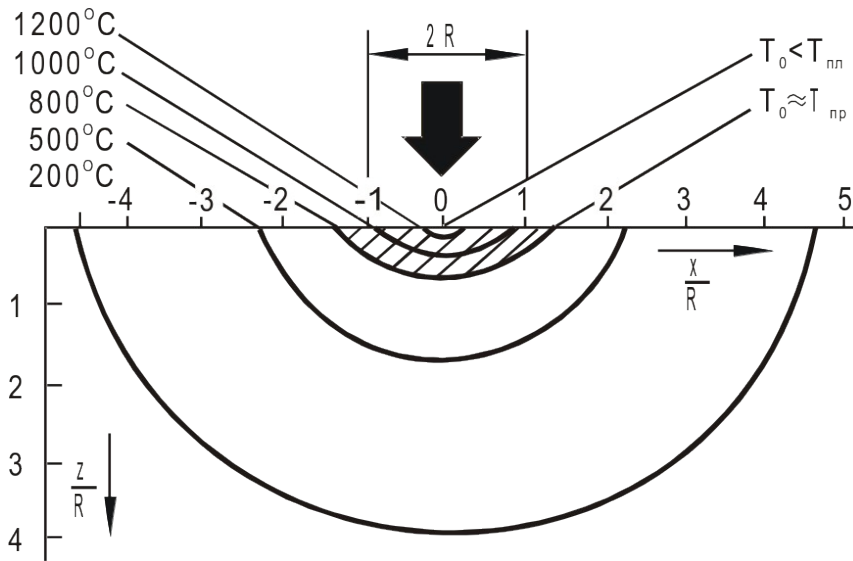


Рис. 22. Изотермы в обрабатываемой детали при установившемся действии электронного луча с Гауссовским распределением плотности энергии: z – расстояние от поверхности, R – радиус Гауссовского распределения.

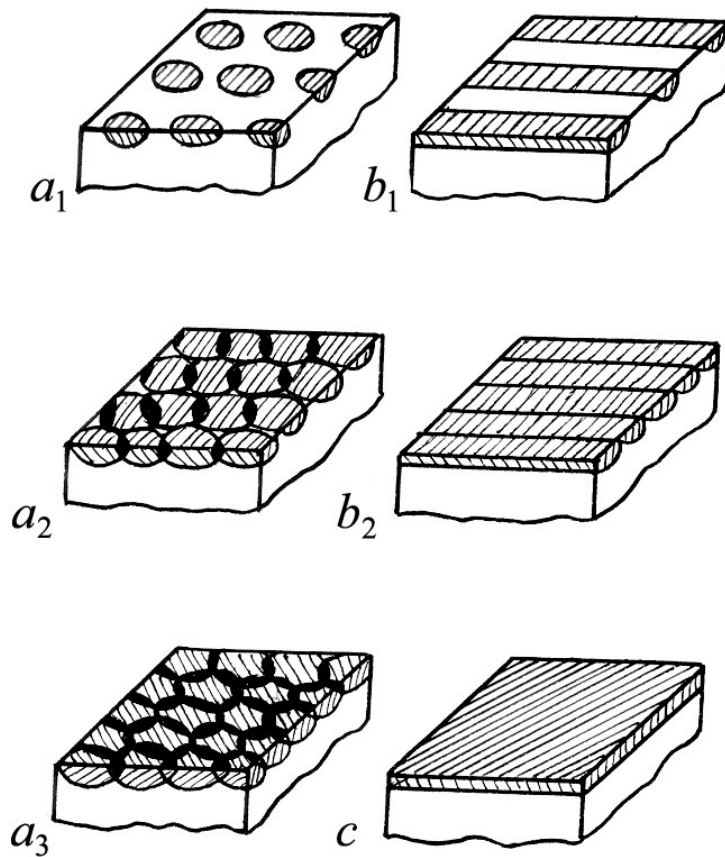


Рис. 23. Различные варианты обработки поверхностного слоя электронным лучом.

ределенных режимах сканирования луча заданной мощности можно избежать такого неоднородного воздействия. Для этого необходимо, чтобы ранее нагретые области не успевали охлаждаться ниже температуры мартенситного превращения за время сканирования (рис. 23с). При обработке больших площадей с этой целью может быть также использовано двухмерное сканирование.

Рис. 24 иллюстрирует изменение температуры в некоторой точке металла при различных описанных выше схемах воздействия электронного луча на металл. При неподвижном луче температура непрерывно растет, пока не прекратится воздействие луча (рис. 24а). Этот нагрев длится столь короткое время ($10^{-2} \div 1$ с), что надежный контроль за процессом неэффективен, и мощность электронного луча (обычно 5 кВт) используется лишь в малой степени. При движении электронного луча с почти Гауссовским распределением плотности мощности температура в данной точке поверхности повышается, достигает максимума после прохода области луча, соответствующей вершине Гауссовской плотности, а затем постепенно снижается (рис. 24б). При циклической подаче энергии с частотой около 1 Гц формируются ярко выраженные температурные осцилляции (рис. 24в).

Как уже отмечалось, кинетическая энергия электронов превращается в тепловую энергию в слое абсорбции толщиной S . Этот слой можно рассматривать как аккумулятор энергии с константой времени разрядки $\tau = S^2/a$, где a – температуропроводность. Для сталей $a \approx 0,05$ см²/с, так что при $U = 60$ кВ $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$ с. Для поддержания почти постоянной температуры один импульс энергии должен следовать за другим с интервалом времени, меньшим τ . На практике это требование обычно удается соблюсти.

Рис. 25 иллюстрирует влияние частоты сканирования f поперек направления подачи детали на относительную преобразуемую в тепло энергию $e_{\text{отн}}$ при разных скоростях подачи (v) при допущении, что поверхностный слой не плавится. Относительная преобразуемая в тепло энергия $e_{\text{отн}}$ оценивается как отношение энергий при текущей частоте f и частоте, равной 100 Гц. Из рис. 25 видно, что при очень высоких частотах преобразуемая в тепло удельная энергия стремится к пределу насыщения. Это обусловлено тем, что при очень высоких частотах соблюдается отмеченное выше требование к τ для достижения постоянства температуры; при этом средняя температура в поверхностном слое достигает значений, близких к точке плавления. При частотах около 100 кГц формируется довольно протяженное постоянное по поверхности поле температур, которое дает в металле поле изотерм, почти параллельных поверхности. В итоге термически обработанный слой отделен от основного металла достаточно гладкой поверхностью.

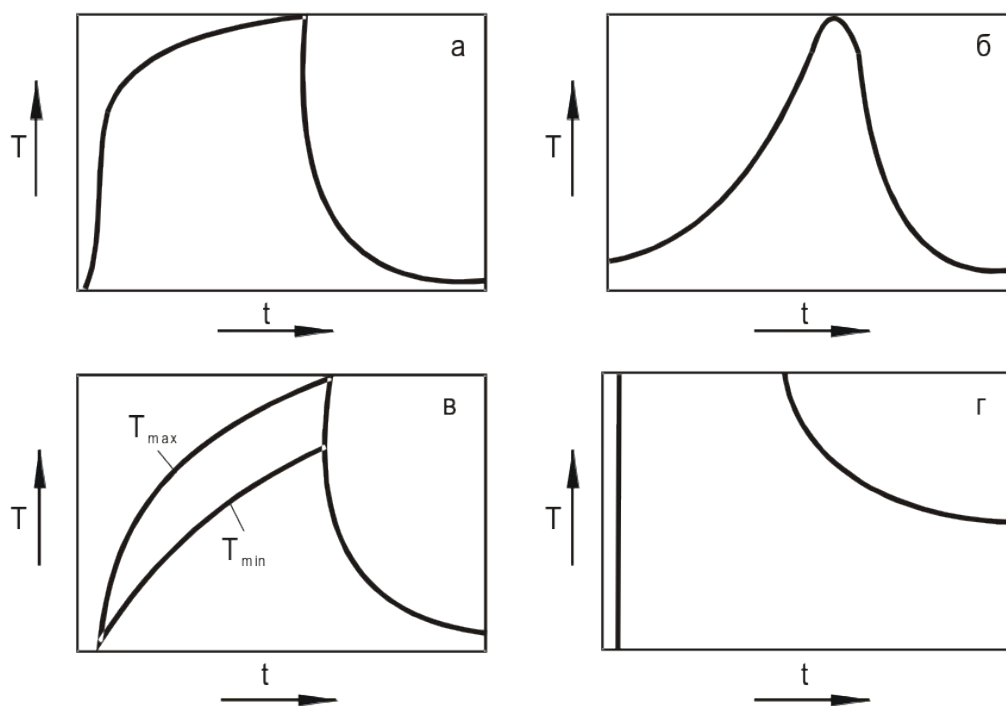


Рис. 24. Изменение температуры со временем в заданной точке детали при различных способах подачи энергии электронного луча: а) точечное действие при постоянной мощности; б) движущийся луч с Гауссовским распределением плотности мощности; в) циклическое растровое сканирование с частотой около 1 кГц и движением детали; г) поверхностно-изотермический перенос энергии.

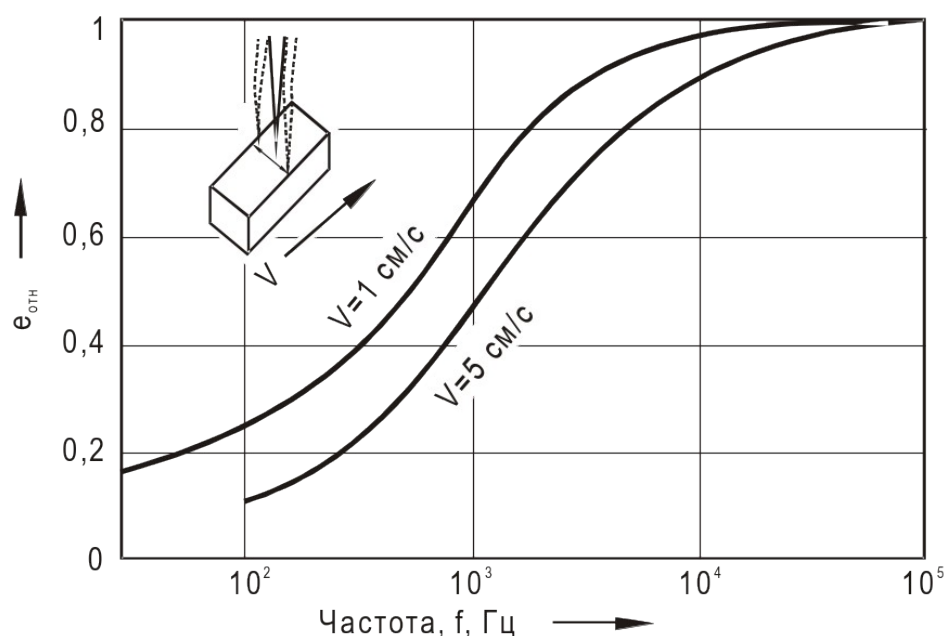


Рис. 25. Зависимость относительной ($e_{отн}$) преобразуемой в тепло удельной энергии от частоты (f) при обработке без расплавления поверхности: V – скорость перемещения детали.

Рис. 26 иллюстрирует схему двумерного высокоскоростного сканирования поверхности металла электронным лучом. В результате сканирования и последующего охлаждения в металле формируется слой, испытавший превращения, и зона термического влияния. При расплавлении поверхностного слоя металла к ним еще добавляется зона оплавления. Толщина этих слоев в определенных пределах регулируется изменением мощности луча, параметров сканирования, а также степени расфокусировки и эллиптичности электронного луча.

Контроль плотности мощности при расфокусировке или эллиптическом искажении электронного луча связан с определенными трудностями, обусловленными плохой воспроизводимостью. Более удачной считают термическую обработку с использованием хорошо сфокусированного луча, распределение мощности которого контролируется в широких пределах высокочастотным его колебанием. В итоге на поверхности формируется источник тепла с постоянной температурой, которая поддерживается максимально возможной от начала до конца подачи энергии (рис. 24г). Тепло от этого источника внутрь тела передается по механизму теплопроводности.

При стационарном электронном луче и перемещающейся детали необходимое распределение мощности в направлении движения детали задается функцией отклонения. Для того чтобы получить однородное температурное воздействие, линии обработки металла электронным лучом должны располагаться на разных вполне определенных расстояниях вдоль движения детали (рис. 27), что обеспечивается с помощью программного устройства. В начальный период обработки необходимая для быстрого нагрева высокая плотность подачи энергии достигается близким расположением линий воздействия. Затем расстояние между линиями должно возрастать, так как для обеспечения постоянства теплового воздействия удельная мощность должна изменяться по закону $q \sim \tau^{-1/2}$ (τ - время). Когда расстояние между линиями меньше диаметра луча, осуществляется квази-непрерывная доставка энергии. Если это расстояние становится больше диаметра луча, то следует расширять фокальное пятно в направлении движения детали.

Расстояние между линиями воздействия луча x_i определяется соотношением:

$$x_i/A_x = N^{-2}(i^2 - i + 1/2); \quad i = 1 \div N \quad (3)$$

где A_x - амплитуда сканирования в направлении движения детали; x_i - положение i - следа; N - число использованных следов.

Смысл амплитуды сканирования иллюстрирует рис. 28, на котором приведен статистический вес $\psi(x)$ распределения плотности мощности в направлении движения детали при расположении источника тепла на ее поверхности, и для которого соблюдается закон

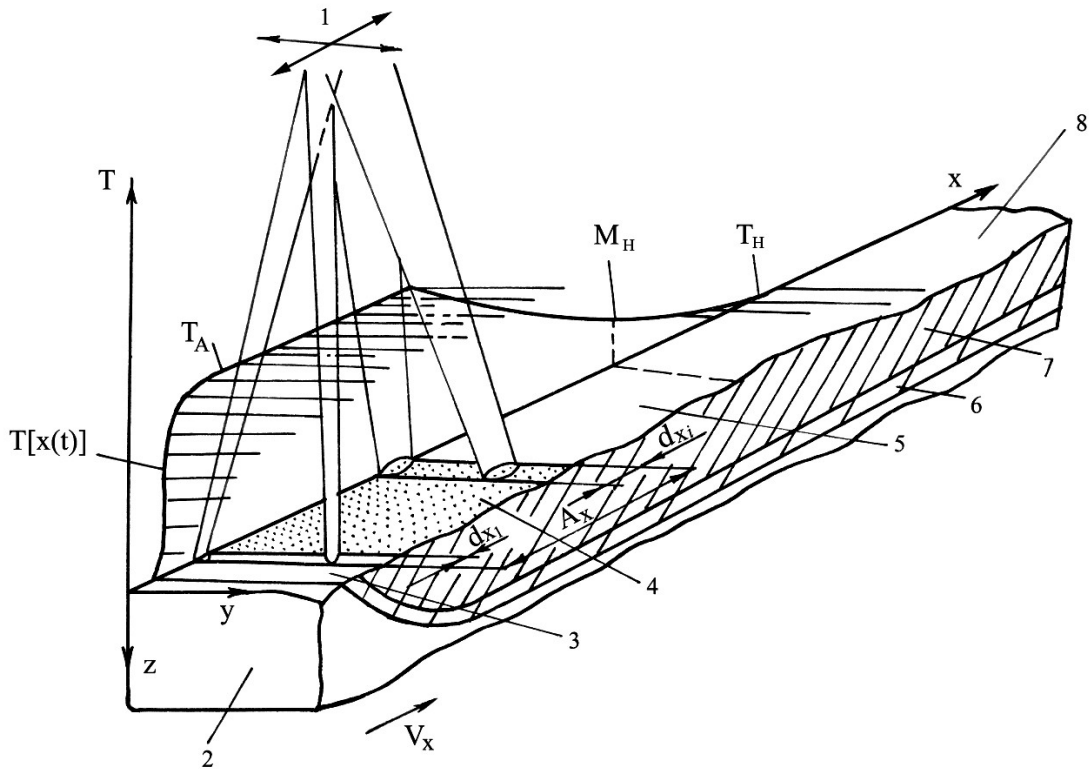


Рис. 26. Схема двухмерного высокоскоростного сканирования детали электронным лучом (1 – направления двухмерного сканирования, 2 – деталь, 3 – зона перед источником нагрева, 4 – поле действия электронного луча, 5 – зона охлаждения, 6 – зона термического влияния, 7 – слой, испытавший превращения, 8 – закаленный слой, d_{x1} и d_{x2} – размер электронного луча в начале и конце сканирования в направлении движения детали, A_x – амплитуда сканирования в направлении движения детали; (применительно к сталям: T_A – температура аустенизации, M_H – температура начала мартенситного превращения, T_H – начальная температура).

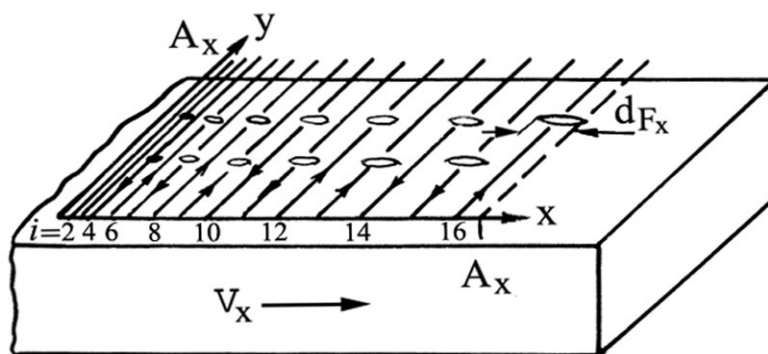


Рис. 27. Расположение следов y -отклонения в x - y отклоняющем поле для поверхностного изотермического источника тепла. Относительные значения x_i/A_x и d_i/A_x рассчитаны для $N=16$, где x_i – положение i -того следа; A_x – амплитуда сканирования в направлении перемещения детали, а d_{xi} – размер луча в направлении x в i -той позиции.

$q \sim \tau^{-1/2}$. Из этой схемы видно, что A соответствует расстоянию вдоль оси x , соответствующему статистическому весу $\psi(x) = 1$.

Рис. 27 иллюстрирует схему расположения следов обработки для $N = 16$. Описанный метод обработки обеспечивает хорошо воспроизводимую связь между удельной мощностью электронного луча и глубиной термически обработанного слоя.

2.3. Общие технологические схемы обработки электронным лучом

Все возможные разновидности воздействия электронного луча на металлы можно разбить на две группы: а) без расплавления поверхностного слоя; б) с расплавлением металла (рис. 29, 30). Электронно-лучевая термическая обработка без расплавления металла включает в себя простые технологии и комбинированные технологии. К простым технологиям относят закалку, отжиг и рекристаллизационный отжиг. Комбинированные технологии сочетают в себе двойное термическое воздействие (термические/термические процессы); химико-термические и термические процессы; термомеханические и термические процессы (рис. 29). Не все приведенные на рис. 29 схемы имеют одинаковое практическое значение. Они просто иллюстрируют возможности электронно-лучевой термической обработки (малоизученные процессы отмечены пунктиром).

Электронно-лучевая обработка с расплавлением поверхностного слоя включает в себя оплавление, легирование и нанесение защитных покрытий. На рис. 30 дана краткая характеристика разновидностей этих технологических процессов и достигаемые при этом эффекты.

Электронно-лучевая обработка с расплавлением поверхности создает большие технологические возможности воздействия на металл по сравнению с предыдущей схемой обработки. Расплавление позволяет получить поверхностные слои дендритной кристаллизации, аморфные слои основного металла и нанесенного на поверхность материала, уплотненные слои на пористых материалах, осуществить легирование из расплава и газовой фазы с формированием легированного поверхностного слоя, в том числе и химико-термическую обработку, нанести слой покрытия с нерастворимыми в металле частицами.

Выбирая тот или иной вариант технологического воздействия электронного луча, можно создать поверхностные слои с определенными свойствами и тем самым обеспечить заданные служебные свойства стали или сплава.

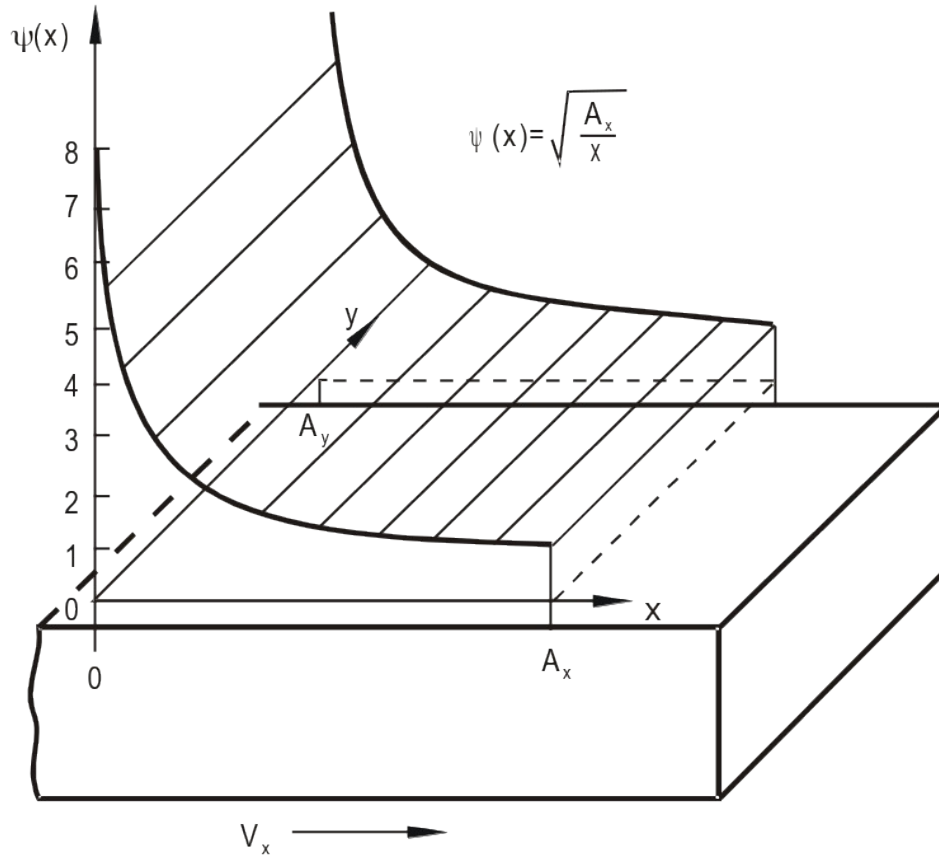
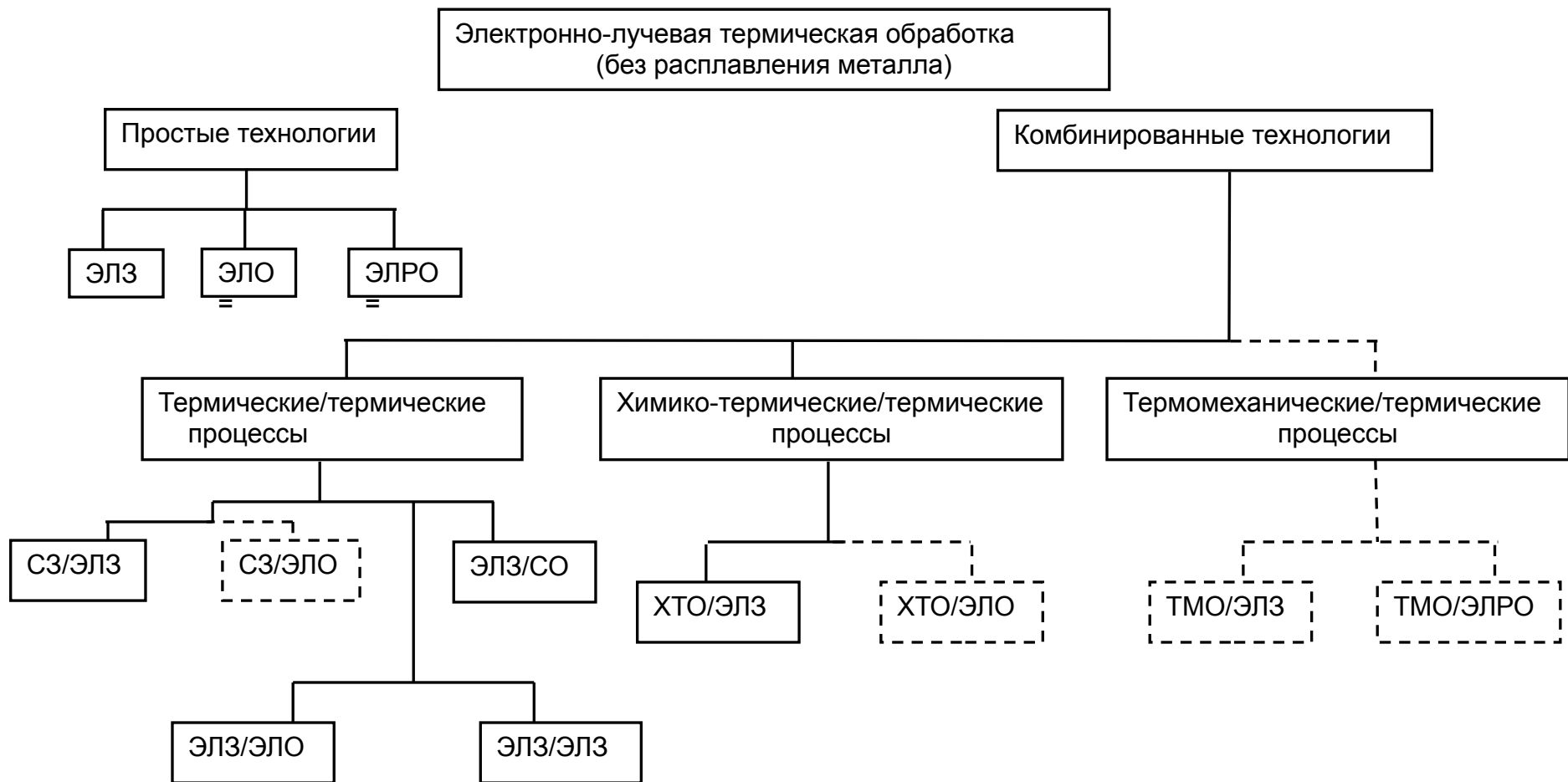


Рис. 28. Статистический вес $\psi(x)$ плотности мощности в направлении движения детали (x) для поверхностно-изотермического переноса энергии в соответствии с рис. 26.



ЭЛЗ - электронно-лучевая закалка
 ЭЛО - электронно-лучевой отпуск
 ЭЛРО - электронно-лучевой рекристаллизационный отжиг
 СЗ - стандартная закалка

СО - стандартный отжиг
 ХТО - химико-термическая обработка
 ТМО - термомеханическая обработка

Рис. 29 Технологические схемы термической обработки металлов с нагревом электронным лучом без расплавления поверхностного слоя

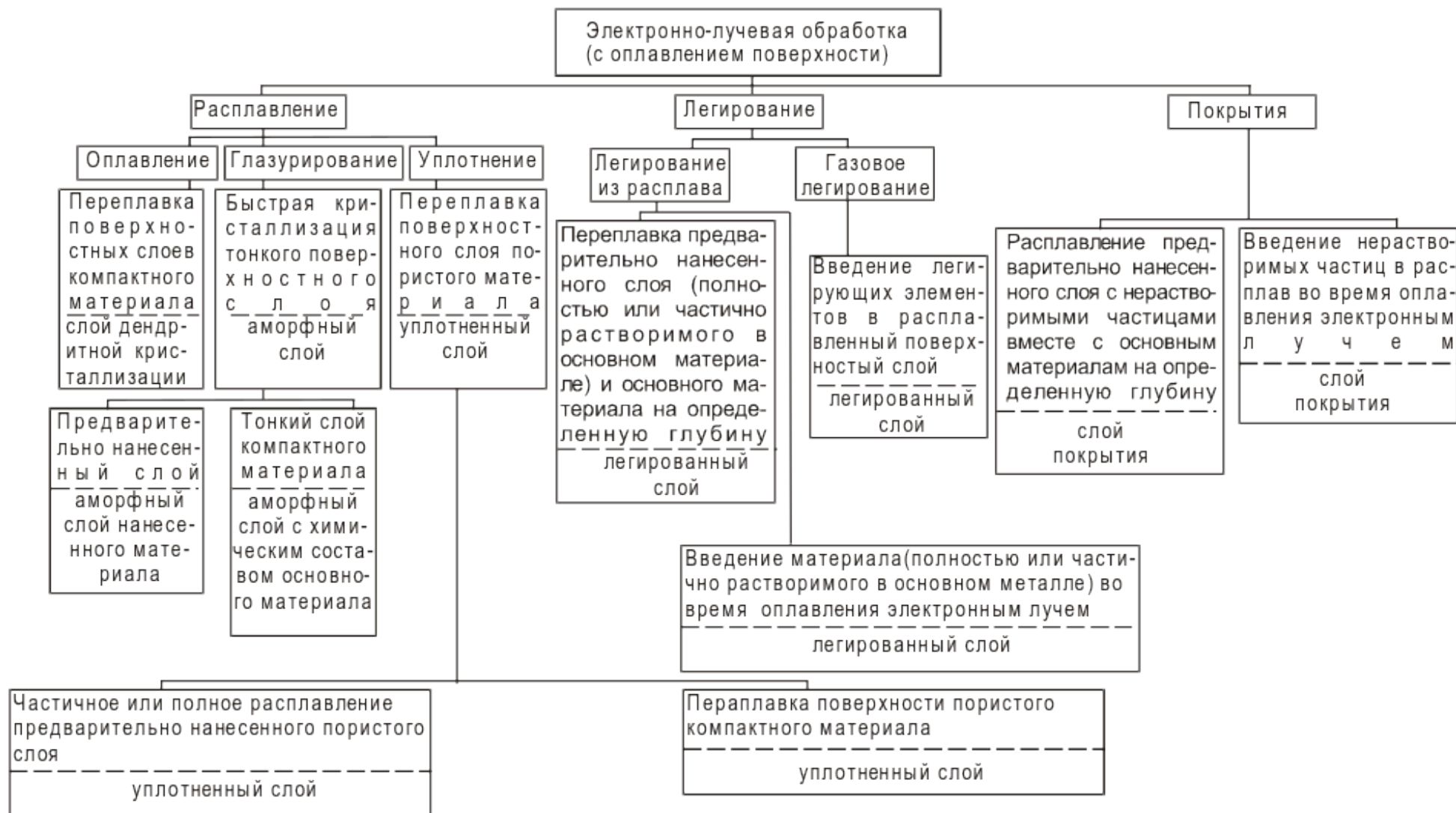


Рис. 30. Технологические схемы термической обработки металлов с нагревом электронным лучом с оплавлением поверхностного слоя.

В наибольшей степени освоена электронно-лучевая закалка, особенно сталей. Эта технология закалки применима для обработки не только плоских поверхностей, но и тел вращения, внутренних поверхностей деталей, если луч может быть направлен перпендикулярно к ним или под углом к нормали менее $30 \div 45$ градусов. Если детали должны быть не только закалены, но и сварены, то эти процессы могут быть объединены в едином цикле обработки. Аналогично отжиг для снятия напряжений после электронно-лучевой сварки может выполняться в едином процессе со сваркой. Однако крупногабаритные детали неудобны для электронно-лучевой термической обработки.

Описанная выше технология поверхностно-изотермического переноса энергии позволяет проводить закалку с шириной следа до $30 \div 50$ мм, глубиной закаленного слоя от 0,1 до 2 мм при скорости перемещения образца (детали) $1 \div 10$ см/с.

В соответствии с требованиями практики можно обеспечить большое разнообразие конфигураций областей, подвергнутых электронно-лучевой закалке (рис. 31). Так, например, можно оставить некоторые участки незакаленными (мягкими) с тем, чтобы более легко проводить их механическую обработку. Края детали можно не подвергать воздействию электронного луча, чтобы избежать оплавления. Кроме того можно снижать интенсивность потока энергии в тех местах, где должны располагаться отверстия или какие-либо другие конструктивные элементы, выполняемые резанием.

Обычно упрочненный слой имеет одинаковую толщину по всей длине детали. Однако в некоторых случаях по условиям нагружения детали или по технологическим соображениям нужна переменная толщина упрочненного слоя (рис. 32). Упрочненный слой такой конфигурации можно сформировать программированным управлением электронным лучом. Обычно упрочнение электронным лучом проводят, нагревая поверхностный слой до температур, близких к температуре плавления обрабатываемого материала, так как при этом наиболее эффективно используется мощность луча. Однако это может привести к нежелательным структурным изменениям (росту зерна, увеличению количества остаточного аустенита в сталях, недопустимо сильному газонасыщению в титановых сплавах и т.д.) и, как следствие, ухудшению эксплуатационных свойств. Соответствующее управление электронным лучом позволяет выбрать такую подачу энергии, что при полном использовании мощности электронного луча температура в поверхностном слое будет снижена до оптимальной (в определенных пределах). При этом, однако, уменьшается глубина упрочненного слоя (рис. 33).

В ряде случаев требуется провести отпуск упрочненного путем электронно-лучевой обработки материала, в частности, когда требуется повышенная вязкость поверхностного

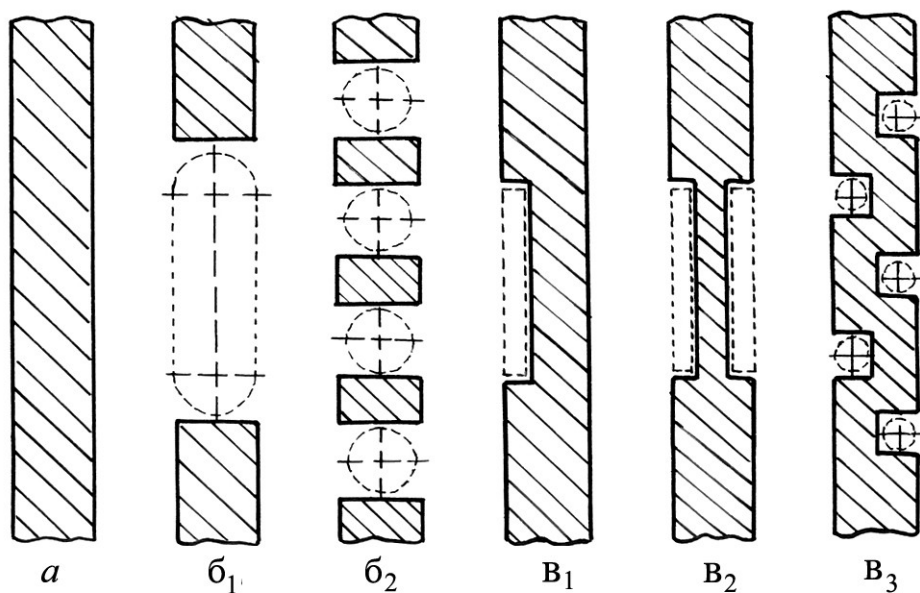


Рис. 31. Примеры конфигураций обработанных слоев, которые можно получить электронно-лучевой закалкой (вид сверху): а – постоянной ширины, б – прерывистые слои (одинарные и многократные), в – переменной ширины (пунктиром обозначены области, которые подвергаются механической обработке с целью получения отверстий, пазов и т.д.).

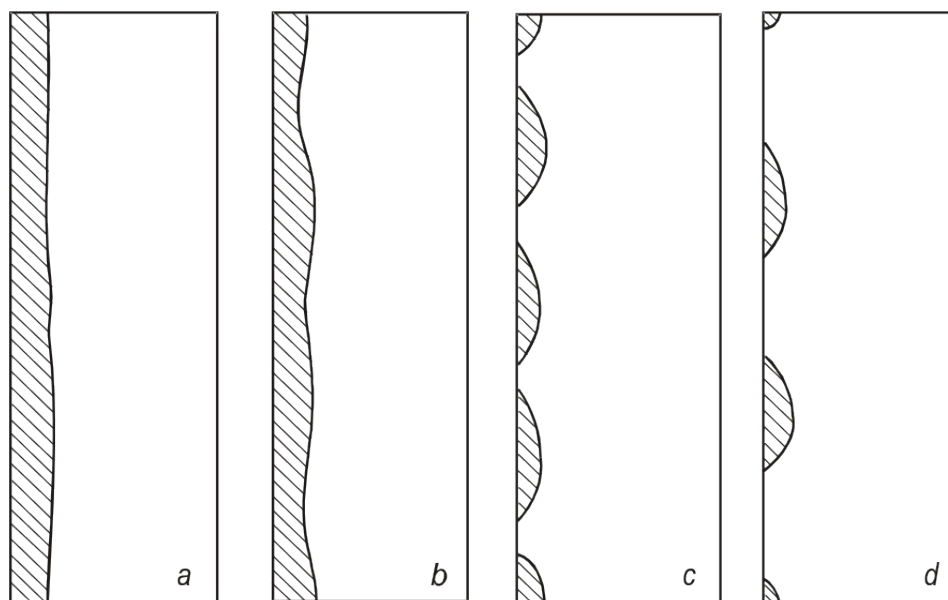


Рис. 32. Примеры конфигураций обработанных электронным лучом слоев (продольный вид вдоль направления движения детали).

слоя стали. Путем применения описанных выше способов отклонения электронного луча можно в едином технологическом процессе сочетать закалку и отпуск.

Обработкой электронным лучом можно создать структуру «сэндвича», состоящую из двух слоев различной твердости (рис. 34). Этот вариант закалки с нагревом электронным лучом может быть осуществлен путем последовательной двухступенчатой обработки, а также в едином технологическом процессе путем программируемого отклонения электронного луча в поле сканирования.

Относительная легкость управления электронным лучом (фокусировки и его отклонения) является преимуществом электроннолучевой термической обработки по сравнению с другими лучевыми технологиями (лазерной, плазменной и др.). Легкость управления электронным лучом позволяет осуществить разнообразные технологические решения с формированием заданных эксплуатационных свойств материала. Следует, однако, учитывать, что эти решения зависят также от природы обрабатываемого материала (системы и степени легирования, протекающих в нем превращений и т.д.).

2.4. Термическая обработка сталей и сплавов

Наибольшее число исследований было выполнено по электроннолучевой закалке сталей. В результате этих исследований было установлено, что при закалке сталей с нагревом электронным лучом без расплавления поверхности облучаемых образцов или деталей образуется рельеф, превышающий максимальную шероховатость исходного материала, если он был достаточно гладким (полированным). При закалке с нагревом поверхностно-изотермическим источником тепла уровень шероховатости поверхности колеблется в пределах от 5 мкм до 1,5 мкм при исходной шероховатости 1,5 мкм. Образование поверхностного рельефа - это результат протекания при охлаждении мартенситного превращения.

Наибольшая величина аустенитных зерен наблюдается у поверхности образца и уменьшается по мере удаления от нее. При повышении удельной мощности облучения и длительности обработки размер аустенитных зерен возрастает.

Структура закаленного слоя стали обычно представлена мартенситом, толщина пластин тем меньше, чем ниже удельная мощность облучения, продолжительность воздействия потока электронов и чем больше расстояние от поверхности вглубь образца или детали. Доэвтектоидные стали после электронно-лучевой закалки часто имеют неоднородную структуру, особенно при малой интенсивности электронного луча. В

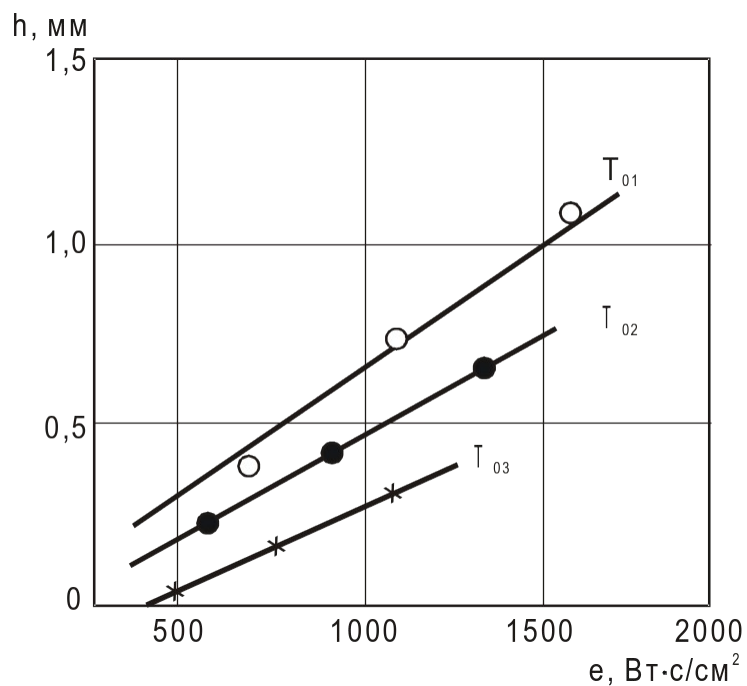


Рис. 33. Зависимость глубины закалки с нагревом электронным лучом от его удельной мощности (e) при различных температурах поверхности $T_{пл} > T_{01} > T_{02} > T_{03} > A_{c3}$ (на примере стали).

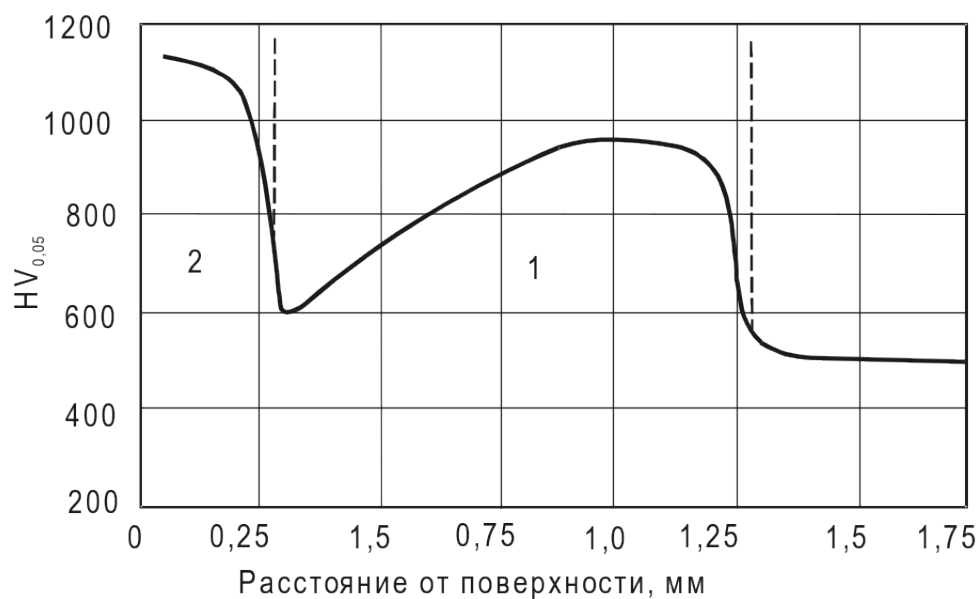


Рис. 34. Изменение твердости по Виккерсу по глубине закаленного с нагревом электронным лучом слоя при формировании структуры «сэндвича» путем двойной последовательной обработки стали 50CrV4, подвергнутой предварительно закалке и отпуску. Режимы обработки электронным лучом: 1) $e = 2000 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$, $\tau = 0,82 \text{ с}$, $v_x = 1 \text{ см} / \text{с}$; 2) $e = 450 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$, $\tau = 0,04 \text{ с}$, $v_x = 5 \text{ см} / \text{с}$; (e – удельная энергия, τ – время трансформации энергии луча в тепло, v_x – скорость перемещения детали).

высокоуглеродистых сталях помимо мартенсита фиксируется остаточный аустенит. В сталях с содержанием углерода $0,9 \div 1,0\%$ количество остаточного аустенита доходит до $25 \div 50\%$. Большое содержание остаточного аустенита в поверхностном слое обусловлено высокой температурой в поверхностном слое, которая всего на несколько градусов ниже солидуса. Это приводит к растворению карбидов, присутствующих в исходной структуре стали, обогащению аустенита легирующими элементами и снижению температуры начала мартенситного превращения. В зависимости от состава и условий обработки кроме этих фаз в структуре поверхностного слоя может присутствовать феррит (в доэвтектоидных сталях) и другие неравновесные продукты превращения. В заэвтектоидных сталях с увеличением расстояния от поверхности часто наблюдается изменение структуры от реечного мартенсита с остаточным аустенитом к пластинчатому мартенситу с нерастворенными карбидами. На достаточном удалении от поверхности сохраняется исходная структура стали.

В результате электронно-лучевой закалки возрастает твердость поверхностного слоя сталей. На рис. 35 приведено типичное распределение твердости вдоль поверхности сталей в направлении, перпендикулярном к направлению перемещения образца, который был подвергнут двумерному электронно-лучевому сканированию по схеме, приведенной на рис. 26. Крутой спад твердости на краю облученной электронным лучом полосы и плато твердости внутри нее типичны для лучевых способов закалки и обусловлены описанными выше структурными изменениями. В направлении, перпендикулярном поверхности, твердость внутри закаленного слоя довольно высока и почти постоянна, а при переходе к основному металлу резко снижается (рис. 35). Если сталь предварительно подвергалась закалке и отпуску, то в переходном от облученной полосы к основному металлу слое формируется минимум твердости (см. рис. 35), который проявляется тем сильнее, чем ниже была температура отпуска.

Максимум твердости поверхностного слоя после электроннолучевой закалки доэвтектоидных сталей не превышает или незначительно выше твердости после обычной закалки и может быть значительно выше уровня твердости после обычной закалки для заэвтектоидных сталей. Уровень твердости поверхностного слоя после электронно-лучевой закалки определяется его структурой: соотношением количества мартенсита и остаточного аустенита и распределением нерастворившихся карбидов. Эти факторы зависят не только от режимов электронно-лучевой закалки, но и от состава и исходной структуры стали. При электронно-лучевой обработке доэвтектоидных сталей образуется в основном крупнопластинчатый мартенсит с относительно невысокой концентрацией углерода. Поэтому уровень твердости поверхностного слоя этих сталей после электронно-лучевой

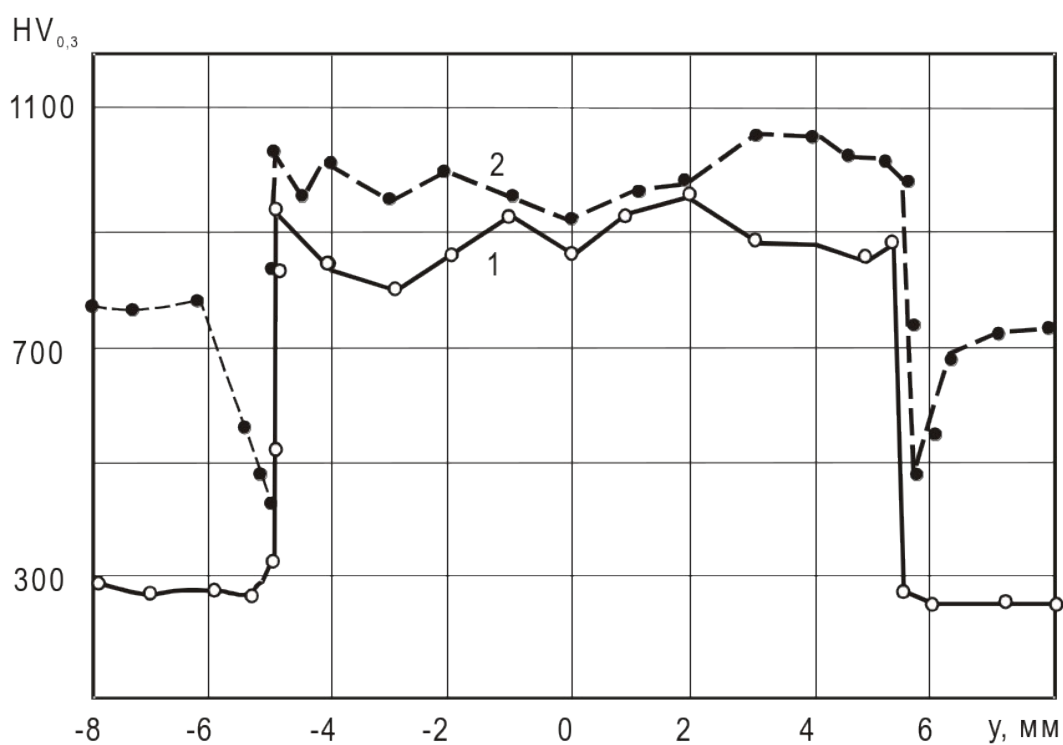


Рис. 35. Распределение твердости по поверхности сталей 55Cr1 (0,51%С, 0,26%Cr) и С100W (0,97%С, 0,11;Cr) в направлении, перпендикулярном перемещению образца, после закалки с нагревом электронным лучом по способу двухмерного высокочастотного сканирования; исходная обработка: сталь 55Cr1 – нормализация (1); сталь С100W – закалка + отпуск (2).

закалки сравнительно невысок. Твердость поверхностного слоя заэвтектоидных сталей может быть выше, чем после обычной закалки, если формируется тонкопластинчатый мартенсит при небольшом количестве остаточного аустенита.

Минимум твердости в переходной зоне при электронно-лучевой закалке предварительно закаленных или закаленных и отпущенных при низких температурах сталей обусловлен процессами высокотемпературного отпуска. Зона электронно-лучевого отпуска тем больше, чем ниже была температура предварительного отпуска.

Применение для нагрева сталей ленточного электронного луча позволяет обрабатывать за один проход поверхности трения качения, что обеспечивает большую равномерность структуры и свойств поверхностных слоев сталей вдоль направления движения луча. Подобная обработка дорожек качения подшипников из стали ШХ15 без оплавления поверхности привела к формированию слаботравящегося «белого» поверхностного слоя со структурой мелкокристаллического мартенсита без видимых карбидных включений. При этом по данным А.А. Шульгин и Г.В. Дудко микротвердость поверхностного слоя (H_{50}) возрастает от 8000 МПа в исходном термически упрочненном состоянии до 14000 МПа после обработки электронным лучом. Между «белым» слоем и основным металлом находилась зона отпуска, представленная трооститом и карбидной сеткой, с микротвердостью $H_{50} = 6000 \div 6500$ МПа.

После традиционной термической обработки подшипники наработывают 350 ÷ 400 ч и затем выходят из строя, в основном, из-за питтинг-износа внутреннего кольца. После обработки внутренних колец электронным лучом на глубину 140 ÷ 160 мкм время наработки возрастает до 680-700 ч. При этом питтинг-износа не наблюдалось, а выход подшипников из эксплуатации произошел из-за образования поверхностных трещин, начинавшихся в зоне отпуска. Повышение работоспособности колец обусловлено не только описанными выше структурными изменениями, но и значительным увеличением плотности дислокаций, а также формированием в поверхностном слое сжимающих напряжений.

Электронно-лучевое упрочнение сталей с оплавлением поверхности позволяет получить упрочненный слой большей толщины и с более высокой твердостью по сравнению с обработкой без оплавления. Так, в частности, по данным Радченко М.В. и др. электронно-лучевое упрочнение хромоникельмолибденовых сталей с самозакалкой из жидкого состояния позволяет получить композиционные структуры с твердостью в 5-2 раза большей исходного значения при сохранении вязкости на прежнем уровне. Сочетание высокой твердости и вязкости обусловлено формированием в упрочненном слое дендритной структуры, состоящей из тонкопластинчатого мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита, а также вакуумным рафинированием переплавленного металла. Такие структуры,

отвечающие принципу Шарпи, эффективны для повышения работоспособности валков обжимных и черновых клетей при прокатке.

Электронно-лучевая обработка с расплавлением поверхности позволяет значительно повысить микротвердость поверхностных слоев сталей, а следовательно, и их износостойкость. Электронно-лучевую обработку с расплавлением при больших скоростях перемещения луча по поверхности (до 26 м/с) называют «глазурированным». Глазурирование углеродистых сталей AISI, 1045, 4150 и 1090 с использованием в качестве источника электронов пушки мощностью 15 кВт с ускоряющим напряжением 60 кВ позволило получить поверхностные слои с микротвердостью 11000 МПа. Обработка быстрорежущей стали (8 и 12%W; 5 и 1%Mo; 2 и 4%V) электронным лучом с плотностями мощности от 19 до 89 кВт/см² привело к расплавлению поверхности на глубину от 1 до 8 мм. Микротвердость расплавленной зоны составляла 8500 МПа, а после обработки холодом и отпуска возрастала до 10000 МПа.

Электронно-лучевая закалка чугунов с расплавлением поверхностного слоя приводит к ухудшению качества поверхности и появлению трещин в ледебурите при мартенситном превращении. По-видимому, эти затруднения можно преодолеть рациональным выбором режимов электронно-лучевой закалки. Так, например, А.А. Никитин с соавторами сообщают, что обработанные лучом валки из половинчатого чугуна трубосварочного стана успешно прошли испытания на Таганрогском металлургическом заводе. Стойкость обработанных электронным лучом валков в 4 раза превышала стойкость валков из легированного чугуна.

Для успешной электронно-термической обработки чугунов их исходная структура должна отвечать следующим требованиям: короткие и тонкие включения пластинчатого графита, равномерно распределенного в матрице, мелкие (диаметром до 30 мкм) включения шаровидного графита, минимальное содержание легирующих элементов в карбидной фазе, однородная структура металлической матрицы.

При электронно-лучевой обработке титановых сплавов в вакууме происходит самозакалка. Толщина закаленного слоя достигает 0,5-5 мм при сохранении исходной структуры сердцевины. Упрочнения закаленного слоя при этом не происходит. Последующие отпуск или старение приводят к повышению твердости поверхностного слоя. По данным Бодяко М.Н. с соавторами микротвердость поверхностного слоя β -сплава ВТ15, обработанного электронным лучом, на 500 МПа ниже микротвердости сердцевины, но диффузия остаточного кислорода в поверхностный слой приводит к повышению его твердости. Поэтому для титановых сплавов представляет интерес упрочнение поверхностных слоев выведенным в атмосферу электронным лучом, что создает условия химико-термической обработки.

Химико-термическая обработка титановых сплавов с электронно-лучевым воздействием приводит к увеличению толщины диффузионного слоя в 1,5-2 раза по сравнению с результатами, полученными традиционными методами ХТО. Вместе с тем, при электронно-лучевой обработке формируется более плавное распределение микротвердости по глубине диффузионного слоя.

Электронно-лучевая обработка сплавов системы Al-Si с оплавлением поверхности приводит к значительному измельчению микроструктуры в поверхностном слое и, как следствие, к повышению износостойкости. Путем электронно-лучевой обработки удалось существенно повысить стойкость поршней дизелей из сплавов системы Al-Si (с 3 тыс. до 7 тыс. часов), шкивов сельскохозяйственных машин из силуминов, валов из стали, применяемых при производстве магнитной ленты (более чем в 4 раза), лопаток паровых турбин (срок службы повышается на 270%).

Нанесение износостойких материалов, проводимое в два или большее число приемов, позволяет получить поверхностные слои с требуемым распределением твердых включений, повышающих износостойкость, причем электронно-лучевым поверхностным легированием можно преодолеть недостатки, присущие покрытиям, нанесенным другими методами.

2.5. Локальная термическая обработка расфокусированным электронным лучом.

В сварных соединениях из сталей и сплавов, особенно при ЭЛС, могут возникнуть значительные как растягивающие, так и сжимающие напряжения. В сварных соединениях, полученных ЭЛС из 75 мм плит сплава ВТ6, растягивающие напряжения σ_x в центре шва могут достигать 800 МПа, т.е. предела текучести. Остаточные напряжения, если их не снять, приводят к снижению работоспособности и надежности сварных соединений, могут вызвать коробление, а иногда привести даже к образованию трещин.

Остаточные сварочные напряжения в титановых сплавах снимают отжигом, преимущественно вакуумным, причем перерыв между сваркой и отжигом не должен превышать 20-60 суток. При изготовлении крупнофюзеляжных самолетов такой перерыв между сваркой и отжигом создавал определенные технологические трудности. В связи с этим на АНТК им. А.Н. Туполева была предложена локальная термическая обработка сварных швов, которая осуществляется непосредственно после ЭЛС расфокусированным электронным лучом с целью частичного снятия остаточных сварочных напряжений.

Локальная термическая обработка (ЛТО) осуществляется в вакууме с нагревом металла до 600-800°C путем сканирования расфокусированного электронного луча вдоль сварного соединения с зоной заданного сечения в пределах технологического припуска.

Локальную термическую обработку расфокусированным электронным лучом выполняют в той же установке, в которой осуществлялась сварка. Локальной термической обработке можно подвергать сварные панели, оребренные лонжероны, бимсы, пояса, баллоны. Локальный нагрев может осуществляться прямоугольным и круглым растром, причем подвижным может быть луч, а неподвижной – обрабатываемая деталь, или наоборот.

Рис. 36 и табл.2 иллюстрируют технологические процессы локальной термической обработки сварных соединений из сплава ВТ6ч, разработанные и освоенные АНТК им. А.Н. Туполева совместно с НПО «АВИТОМ». Панели, в том числе оребренные лонжероны, бимсы, пояса отжигают при температурах 700-800°С при скорости перемещения луча 10 м/ч. После ЛТО остаточные напряжения не превышают 100-200 МПа. Шаробаллоны (обечайки) отжигают при 800-820°С подвижным источником нагрева с вращением детали. После снятия технологического припуска в зоне шва остаточные напряжения не превышают 100-120 МПа. Кольца, трубопроводы, стойки шасси отжигают при 650-700°С. После удаления технологического припуска в зоне сварного шва остаточные напряжения в поверхностном слое глубиной до 1 мм в результате отжига уменьшаются в 1,5-2,0 раза. Временное сопротивление разрыву сварных соединений из сплава ВТ6ч после ЛТО составляет 900-950 МПа при ударной вязкости $KCU=30-45$ Дж/см². Микротвердость поверхностных слоев повышается не более чем на 3-5%, что вполне отвечает техническим условиям.

Локальную обработку электронным лучом можно также использовать для устранения дефектов ЭЛС, в частности трещин, а также для подготовки стыкуемых кромок под сварку (оплавление вместо шабрения).

Таблица 2

Режимы локальной термической обработки сплава ВТ6 расфокусированным электронным лучом

Метод применения (см. рис. 36)	Размеры зоны нагрева, мм	Рабочее расстояние, мм	Сила тока луча, мА	Скорость перемещения луча, м/ч	Температура нагрева, °С	Время нагрева, мин
1	700×100	1800	≤ 510	10	700-850	≤ 35
2	500×80	1800	550-580	15	800-820	32
3	100×50	400	80-120	6-8	650-700	≤ 4
4	220×40	400	120	-	700	20
5	Оплавленная зона: ширина 5-7 мм; глубина 25-35 мм	-	-	6-10	Оплавление	-

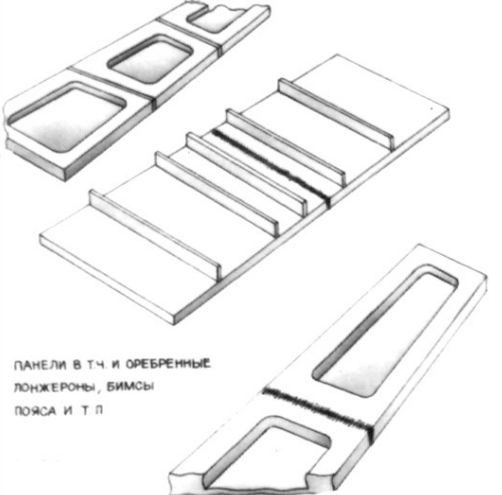


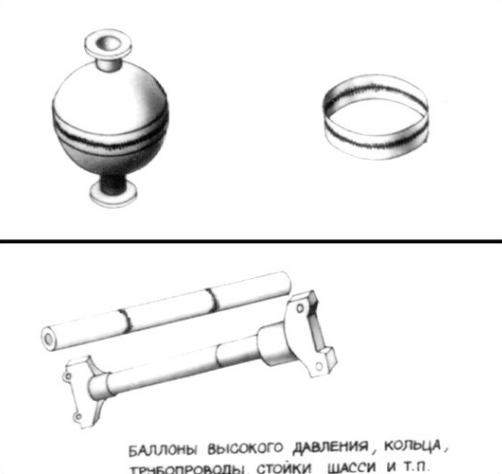


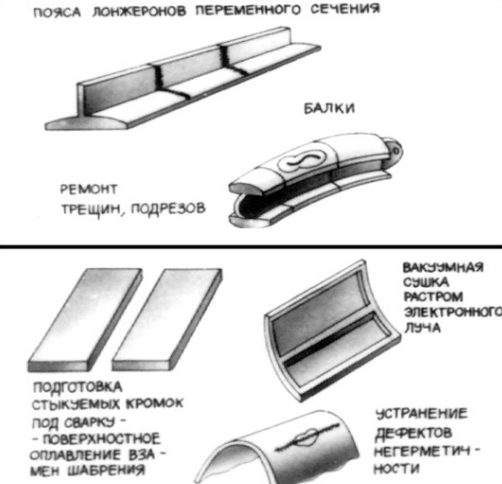

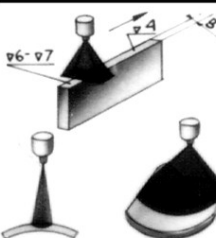
N в/в	НОМЕНКЛАТУРА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ Л.Т.О. ОБЪЕКТОВ	МЕТОД ПРИМЕНЕНИЯ Л.Т.О.
1	 <p>ПАНЕЛИ В Т.Ч. И ОРЕБРЕННЫЕ ЛОНЖЕРОНЫ, БИМСЫ ПОЯСА И Т.П.</p>	 <p>эпл \angle до 6° мм, δ до 60 мм ПОДВИЖНОЙ ИСТОЧНИК НАГРЕВА, ПРЯМОУГОЛЬНЫМ РАСТРОМ</p>  <p>\angle до 1,2°, δ до 40 мм НЕПОДВИЖН. ИСТОЧНИК НАГРЕВА, ПРЯМОУГОЛЬНОГО РАСТРА</p>
2	 <p>БАЛЛОНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, КОЛЬЦА, ТРЕУГОЛЬНЫЕ, СТОЙКИ ШАССИ И Т.П.</p>	<p>ПОДВИЖНОЙ ИСТОЧНИК НАГРЕВА</p>  <p>БАЛЛОНЫ: Φ до 1,5 м S до 50 мм КОЛЬЦА (ОБЪЕМНЫЕ) Φ до 1,5 м S до 50 мм</p>  <p>ПОСЛЕ СВАРКИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДГРЕВА ПЕРЕД СВАРКОЙ</p>
3	<p>ПОЯСА ЛОНЖЕРОНОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ</p>  <p>БАЛКИ</p> <p>РЕМОНТ ТРЕЩИН, ПОДРЕЗОВ</p> <p>ПОДГОТОВКА СТЫКОВЫХ КРОМОК ПОД СВАРКУ - ПОВЕРХНОСТНОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ ВЗА- МЕН ШАБРЕНИЯ</p> <p>ВАКУУМНАЯ САШКА РАСТРОМ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА</p> <p>УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ НЕГЕРМЕТИЧ- НОСТИ</p>	 <p>L до 20 м ШИРИНА ПОЛКИ 200 мм ВЫСОТА РЕБРА \leq 80 мм $\delta = 20$ мм ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА</p>  <p>$\varphi 6 - \varphi 7$ $\times 4$ φ</p>

Рис. 36. Применение локальной термической обработки расфокусированным электронным лучом.

Замена шабрения кромок электронно-лучевой обработкой перед сваркой приводит к повышению среднего числа циклов при повторном статическом нагружении ($0,6 \div 0,75\sigma_B$) в 1,6 раза в результате снижения пористости сварных швов. ЛТО позволяет увеличить время перерыва между ЭЛС и окончательным вакуумным отжигом сварной конструкции в несколько раз.