

УДК 621.791

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛЕЙ

А. И. Поболь¹, В. Г. Залесский²

¹ Научный сотрудник, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: a.pobol@phti.by

² Д. ф.-м. н., директор, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: v.zalesski@phti.by

Реферат

Применение электронно-лучевого воздействия на материалы дает возможность реализовать физико-химические, металлургические, термические, радиационные, биологические и другие виды процессов в широком спектре применений – от стерилизации пищевой и медицинской продукции до выплавки слитков металлов.

При обработке поверхности изделий из сталей путем нагрева потоком электронов в промежутки времени до 10 с может быть организован режим упрочнения электронно-лучевой закалкой (ЭЛЗ) локальных участков детали. В отличие от метода объемной закалки при ЭЛЗ не требуется закалочная среда, охлаждение нагретого слоя материала происходит путем отвода тепла в ненагретую сердцевину изделия. Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения структура стали после ЭЛЗ измельчается, твердость закаленных структур выше по сравнению с полученными объемной закалкой.

Режимы проведения ЭЛЗ определяются для применяемой марки материала, конкретного изделия, требуемой конфигурации упрочняемого участка, места расположения на его поверхности детали и определяются для имеющегося типа ЭЛ оборудования. Рациональные значения параметров ЭЛЗ могут быть выбраны с использованием моделирования тепловых процессов. Моделирование и экспериментальное исследование электронно-лучевого воздействия позволяет минимизировать энергозатраты при проведении процессов закалки сталей, при котором количество передаваемого тепла должно быть ограниченным.

Характеристики упрочненной при ЭЛЗ стали зависят от предварительной подготовки структуры и теплофизических свойств материала. Для широко применяемой стали 40Х наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троост-сорбитная структура, получаемая после предварительной закалки с 850 °С и отпуска при 500 °С. Такой режим объемного термоупрочнения с последующей поверхностной ЭЛЗ даёт возможность на изделии с пластичной сердцевиной получить рабочие участки с высокой твердостью материала. Такое сочетание свойств приводит к улучшению эксплуатационных характеристик деталей. Методы ЭЛЗ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими вариантами модифицирования свойств поверхности, в том числе возможностью упрочнения локальных и заглубленных участков.

Ключевые слова: инженерия поверхности, электронно-лучевой нагрев, закалка, моделирование.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRON BEAM HARDENING OF STEELS

A. I. Pobol, V. G. Zaleski

Abstract

The use of electron beam treatment of materials makes it possible to implement physical-chemical, metallurgical, thermal, radiation, biological and other types of processes in a wide range of applications - from food and medical products sterilization to remelting metal ingots.

When processing the surface of steel products by heating with a flow of electrons in a time interval of less than 10 s, a mode of electron beam hardening (EBH) of local part zones can be organized. Unlike the method of volume heat treatment, EBH does not require a hardening medium, cooling of the heated layer of material occurs by heat transfer into the unheated product core. Due to the high heating and cooling rates, the structure of the steel after EBH is refined, and the hardness of the hardened structures is higher compared to those obtained by bulk hardening.

The modes of EBH implementation are determined for the applied grade of material, a specific product, the required configuration of the hardened zone, the location of the part on its surface and for the existing type of electron beam equipment. Rational values of EBH parameters can be selected using thermal process modeling. Simulation and experimental study of electron beam treatment allows minimizing energy input during steel hardening processes in which the amount of heat transferred must be limited.

The characteristics of steel hardened by EBH depend on the preliminary structure preparation and the thermal material properties. For the widely used 40Kh steel, the best combination of dispersion and thermal conductivity is the troostosorbite structure obtained after preliminary hardening from 850 °C and tempering at 500 °C.

This mode of volume heat treatment with subsequent surface EBH makes it possible to obtain working areas with high material hardness on a product with a plastic core. In general, this combination of properties leads to an improvement in the operational products characteristics.

Keywords: surface engineering, electron beam heating, hardening, simulation.

Введение

Для формирования на поверхности деталей машин, инструмента и других изделий износостойких и/или коррозионностойких защитных слоёв, нанесения покрытий, получения соединений одно- и разнородных материалов применяют широкий спектр высокоэнергетических методов воздействия – лазерного и светового излучения, резистивного, индукционного и электронно-лучевого (ЭЛ) нагрева, потоков ионов и плазмы, механической и магнитной обработки и др. При этом формируются участки закаленного или модифицированного материала основы, на поверхность изделия наносятся слои металлических, керамических или композиционных покрытий с широким диапазоном толщин от десятков нанометров до десятков миллиметров, реализуются совмещенные

технологии упрочнения, сваркой или пайкой изготавливаются высокопрочные соединения. Широкие возможности использования ЭЛ потоков показаны в исследованиях, проводимых в нашей стране и в ведущих мировых научных центрах.

Концентрированное ЭЛ воздействие (термическое, радиационное или радиационно-термическое) позволяет реализовать широкий спектр физико-химических, металлургических, биологических и других видов процессов – в том числе стерилизации пищевой и медицинской продукции, получения отверстий и пазов, испарения металлов, сплавов и керамик (с последующей конденсацией или кристаллизацией в виде порошка, частиц, гранул, слоев на изделиях), сварки, аддитивных технологий, зонной очистки, выплавки слитков металлов и др. [1–13].

В то же время готовые технологические решения, как правило, отсутствуют. Это обусловлено тем, что формирование температурных полей, отвод тепла из зоны воздействия и структурные преобразования в материале существенно зависят от многих индивидуальных факторов, таких как геометрия детали и требования к области упрочнения в конкретном изделии, химического состава материала, характеристик электронного пучка и параметров воздействия. В том числе недостаточно изучен вопрос изменения свойств основного материала (прежде всего сталей) при обработке поверхности изделий электронным лучом в режиме упрочнения локальных участков закалкой. При этом в поиске общих закономерностей и оптимальных режимов ЭЛ обработки может значительно помочь создание модели теплового воздействия.

Параметры электронно-лучевого нагрева

Ускоренный пучок электронов создается и формируется в электронно-оптической системе в условиях вакуума. Электроны ускоряются электрическим полем, прикладываемым между катодом и анодом и характеризующимся ускоряющим напряжением $U_{\text{уск}}$ (кВ), и выходят из пушки в виде пучка с силой тока I (А). Под действием ускоряющего напряжения электрон с зарядом e приобретает кинетическую энергию E_k :

$$E_k = e \cdot U_{\text{уск}} \text{ (эВ)}.$$

Мощность потока электронов:

$$Q = I \cdot U_{\text{уск}} \text{ (Вт)}.$$

Плотность мощности $q_{\text{эл}}$ воздействия рассчитывается из зависимости:

$$q_{\text{эл}} = I \cdot U_{\text{уск}} / F \text{ (Вт/см}^2\text{)},$$

где F – площадь зоны нагрева на поверхности изделия.

Энергия ускоренных электронов выделяется в тонком приповерхностном слое толщиной от единиц – десятков микрон для относительно низких значений ускоряющих напряжений (10–150 кВ) до нескольких сантиметров при использовании релятивистских пучков электронов (с энергией 0,5–10 МэВ). Небольшая часть энергии потока при этом теряется [14, 15]. Далее тепло распространяется в глубь объекта по механизму теплопроводности. Вид ЭЛ физико-технологического процесса, интенсивность нагрева и охлаждения изделий и свойства материала после обработки определяются ускоряющим напряжением, мощностью пучка, плотностью мощности, режимом разветки электронного пучка, характерным временем воздействия пучка t (с) или скоростью перемещения зоны нагрева [2–6].

Обработка в режиме закалки локальных участков поверхности

Для реализации режима электронно-лучевой закалки (ЭЛЗ) локального участка поверхности изделия из стали необходимо организовать быстрый нагрев потоком электронов материала приповерхностного слоя до температуры, превышающей начало аустенитного превращения, и обеспечить последующее скоростное охлаждение нагретого материала путем отвода тепла в массу металла (процесс иногда называют «самозакалкой»). Такой режим реализуется источниками электронов с энергией в широком диапазоне от 10 кэВ до нескольких МэВ. Наибольшее распространение в промышленности имеет оборудование, предназначенное для ЭЛ сварки, в котором, как правило, применяются пучки с энергией до 60 кэВ. Ввиду большой плотности мощности электронного луча время нагрева до необходимой температуры может составлять от нескольких секунд до $\sim 10^{-8}$ с. Скорость охлаждения при этом может варьироваться от $\sim 10^\circ\text{C/с}$ до $\sim 10^7^\circ\text{C/с}$ [2, 5, 16–19]. Для осуществления «самозакалки» нагретого слоя соотношение между толщинами этого слоя и детали должно быть не менее 1:4. Интенсивность теплоотвода «в массу» зависит не только от теплофизических свойств металла, но и от расположения нагреваемого участка на поверхности изделия. В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, закалке можно подвергнуть зоны с глубиной от десятков мкм до нескольких мм. Форма упрочненных участков может быть точечной, полосчатой, прямоугольной, спиралеобразной, в виде звезды или любой другой формы.

Как и для других вариантов закалки сталей и сплавов с использованием скоростного нагрева (лазерного, плазменного, ТВЧ, пропусканием тока) при ЭЛ нагреве допустим значительный перегрев

стали без опасения интенсивного роста зерен, поскольку температурный интервал диффузионных процессов при быстром нагреве смещается в область более высоких температур. Так, при скорости нагрева порядка 10^3°C/с и выше температурный интервал аустенитного перехода увеличивается на сотни градусов Цельсия [20]. Характерная особенность скоростного нагрева – формирование химически неоднородной высокотемпературной фазы, что приводит к микронеоднородности структуры, сформированной в процессе закалки. Степень такой неоднородности зависит от исходного состояния и регулируется параметрами нагрева.

Использованное оборудование

Экспериментальные исследования условий реализации различных вариантов ЭЛ обработки проводились с использованием электронно-лучевых комплексов типа ЭЛУ-9Б/ПЗ ЕВ 2,5–15 (Prvá Zváračská, Словакия) с ускоряющим напряжением 60 кВ и максимальной мощностью луча до 30 кВт.

Для обработки в режиме ЭЛЗ применяли образцы из сталей У8 (ГОСТ 1435-99) и 40Х (ГОСТ 4543-71) диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Углеродистая сталь У8 используется для изготовления инструмента, применяемого без разогрева режущих кромок, конструкционная сталь 40Х – валов, осей, зубчатых шестерён и других деталей, которые требуют высокой прочности и долговечности в эксплуатации.

Шлифы материалов для проведения металлографических исследований были приготовлены при помощи комплекса для пробоподготовки компании «Metkon», Турция.

Измерение твердости проводилось на твердомере URBV-VRS, микротвердости – на микротвердомерах DM8 (оба прибора производства AFFRI, Италия) и ПМТ-3. Структуру образцов изучали на оптическом микроскопе МИ-1.

Система управления электронным лучом позволяла реализовывать нагрев расфокусированным лучом, линейное перемещение луча без сканирующей развертки, сканирование луча по заданной траектории и обеспечивала ЭЛ воздействие на материалы в режимах локального точечного нагрева до нужной температуры строго ограниченного участка с высокой плотностью мощности (до $\sim 10^5$ Вт/см²). Тем самым имелась возможность обрабатывать образцы и заготовки на участке (или нескольких произвольно расположенных участках) диаметром порядка 1 мм, линейной либо любой заданной формы с размерами порядка 100 мм, с широким диапазоном вводимой мощности от 100 Вт до 30 кВт.

Моделирование и экспериментальное исследование воздействия на сталь в режиме закалки

Режимы обработки в режиме ЭЛЗ рассчитываются для конкретного изделия, зоны расположения и требуемой конфигурации упрочняемого участка на поверхности детали и определяются для имеющегося типа ЭЛ оборудования. Реальные диапазоны энергетических параметров ЭЛ нагрева имеют тенденцию значительно изменяться по причине непостоянства в процессе воздействия свойств обрабатываемых материалов, в том числе плотности, коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. Оптимальные значения параметров ЭЛ воздействия с учетом требований по ограничению количества передаваемого тепла в изделие могут быть выбраны с использованием моделирования тепловых процессов.

Для моделирования влияния высокоэнергетического воздействия на структуру обрабатываемой детали выбран метод конечно-элементного (КЭ) анализа тепловых полей. Разработана методика КЭ моделирования результатов ЭЛ воздействия в режиме закалки. Задачей стало моделирование условий, наиболее близких к реальным процессам при ЭЛ обработке поверхности без расплавления. За основу взяты данные, полученные экспериментальным путем. Изначально считалось, что вся энергия луча тратится на нагрев, а затем при пересчете, для корректировки результата, применялся коэффициент, учитывающий особенности взаимодействия луча с поверхностью детали.

При моделировании сделан ряд допущений:

– энергия, затрачиваемая и высвобождаемая во время фазовых переходов в материалах, во время нагрева и охлаждения не учитывалась;

– пучок электронов представлялся как равномерный тепловой поток ко всей поверхности благодаря формированию однородного плоского температурного поля при сканировании всей обрабатываемой зоны;

– влиянием излучения нагретой детали и теплопередачи в оснастку благодаря теплопроводности по причине быстрого протекания процесса можно пренебречь.

Экспериментальные исследования ЭЛ нагрева проводились для образца из стали У8 при различной плотности энергии луча (таблица 1). В центре с нижней стороны образца с размерами 30х30х20 мм для термопары выполнено отверстие диаметром 2,5 мм на глубину 19,8 мм, с верхней стороны диаметром 0,4 мм – на 0,2 мм. Спай хромель-алюмелевой термопары располагался у поверхности (рисунок 1). Электронный луч точечной формы диаметром 1 мм с энергией электронов 60 кэВ разворачивался в зону нагрева с размерами 10х10 мм². Мощность и плотность мощности ЭЛ нагрева регулировалась изменением тока луча. Значения температуры регистрировались с помощью шлейфового осциллографа.

Таблица 1 – Режимы ЭЛ обработки образца из стали У8 [5]

№ кривой	1	2	3	4
$q_{эл}$, Вт/см ²	848	1357	1683	2255
t_n , с	14,0	10,0	6,0	2,4

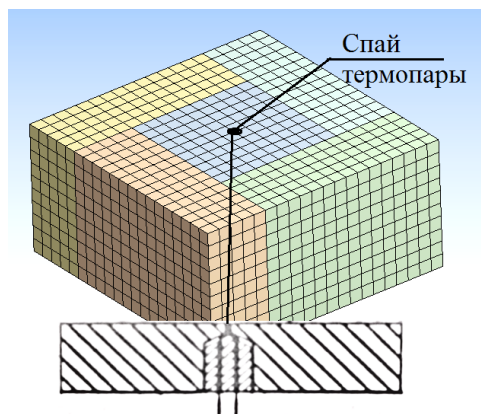


Рисунок 1 – Модель образца с размещенной термопарой

При моделировании плотность мощности потока подбиралась таким образом, чтобы график изменения температуры, полученный КЭ моделированием, максимально совпал с экспериментальным. Внимание уделялось как конечной температуре образца, являющейся показателем количества энергии, поступившей в образец, так и максимальной температуре нагрева образца. Время воздействия соответствовало экспериментальным значениям в соответствии с таблицей 1. Теплофизические свойства стали У8, заложенные в модель, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства стали У8 [21]

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
20	53	7839	452
100	49	7817	477
200	46	7786	511
300	42	7752	528
400	38	7714	548
500	35	7676	565
600	33	7638	594
700	30	7600	624
800	24	7552	724

В результате расчетов получены диаграммы распределения температур в различные моменты времени при нагреве центральной части образца потоком электронов с размерами 10х10 мм² (рисунок 2), которые показывают существенное влияние геометрии обрабатываемой детали и продолжительности воздействия на характер распространения в ней тепла.

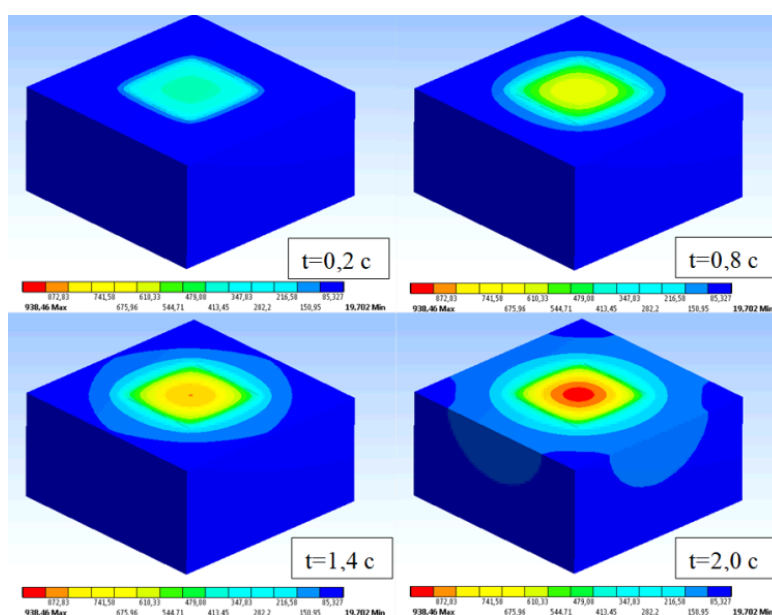


Рисунок 2 – Диаграммы распределения температур в различные моменты времени, полученные конечно-элементным моделированием

Совмещенные графики температуры стали вблизи спая термопары (рисунок 1) в экспериментальном образце и результатов КЭ моделирования представлены на рисунке 3. Графики (1–4) соответствуют номерам режимов ЭЛ нагрева образца в таблице 1. Для удобства сравнения графики 1 и 2 представлены участками, относящимися к последним шести секундам процесса нагрева образца. Цифрами со штрихами обозначены кривые, полученные моделированием.

Неполное соответствие экспериментальных и расчетных данных объясняется следующими причинами: усредненным значением площади облучаемой поверхности в модели (в реальных экспериментах площадь находилась в диапазоне 0,7–1,1 см²); наличием

потери энергии излучения с поверхности нагреваемого тела в реальных экспериментах, не учитываемого при моделировании; некоторым несоответствиям реальных теплофизических свойств, используемым в модели.

Максимальное расхождение наблюдалось между кривыми 2 и 2' и составило 240 °С для участка нагрева. Расхождения экспериментальных и моделируемых кривых на участках максимальных и установившихся температур не превысило 35 °С, что составило 14 % от экспериментальных значений.

Разработанная методика моделирования использована для расчета приближенных энергетических параметров (режимов и циклограмм) процесса ЭЛЗ.

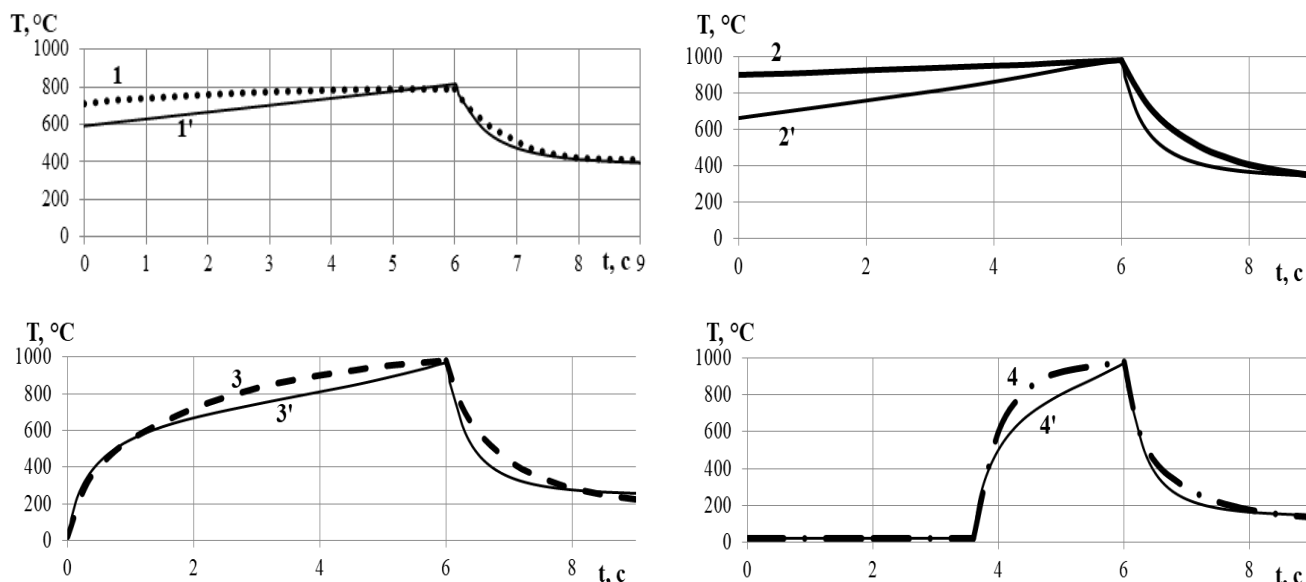


Рисунок 3 – Совмещенные графики температур экспериментальных образцов и результатов конечно-элементного моделирования

Исследование влияния электронно-лучевой заковки на структуру и твердость поверхностного слоя сталей У8 и 40Х

Процесс заковки локального участка поверхности апробирован на образце из стали У8 в виде цилиндра. Луч с плотностью мощности 2,3 кВт/см² разворачивали в зону нагрева размерами 10×10 мм²

при длительности нагрева 2,4 с. После прекращения воздействия происходило охлаждение нагретого слоя стали путем отвода тепла в сердцевину образца. По профилю микротвердости на поперечном шлифе образца (рисунок 4) наблюдался закаленный слой глубиной 0,45 мм.

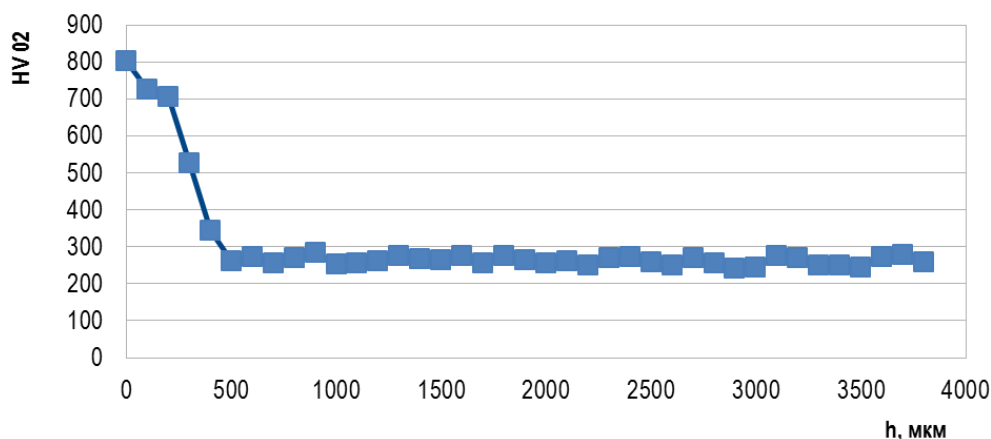


Рисунок 4 – Профиль микротвердости на образце из стали У8 после ЭЛЗ

Микротвердость стали снижается от величины HV_{0,2} 800 в приповерхностной зоне до уровня, соответствующего сердцевине образца. Микроструктура стали – мартенсит заковки и остаточный аустенит. Свойства упрочненного слоя после ЭЛЗ зависели от предварительной подготовки структуры сталей.

В работе исследовались свойства закаленных слоев на образцах из стали 40Х, подвергнутых объемной заковке от 850 °С в масле и отпуску

при 400, 500 и 600 °С на твердость HRC 37, 32 и 22. Микроструктура стали 40Х в исходном состоянии – пластинчатый перлит с ферритной сеткой по границам зерен (рисунок 5а). Размер зерна соответствует 5 баллу по ГОСТ 5639-82. Микроструктура стали после объемной заковки – мартенсит и остаточный аустенит (рисунок 5б). При отпуске при температуре 400 °С образовался троостит (рисунок 5в), при 500 °С – троосто-сорбитная структура, при 600 °С – сорбит (рисунок 5г).

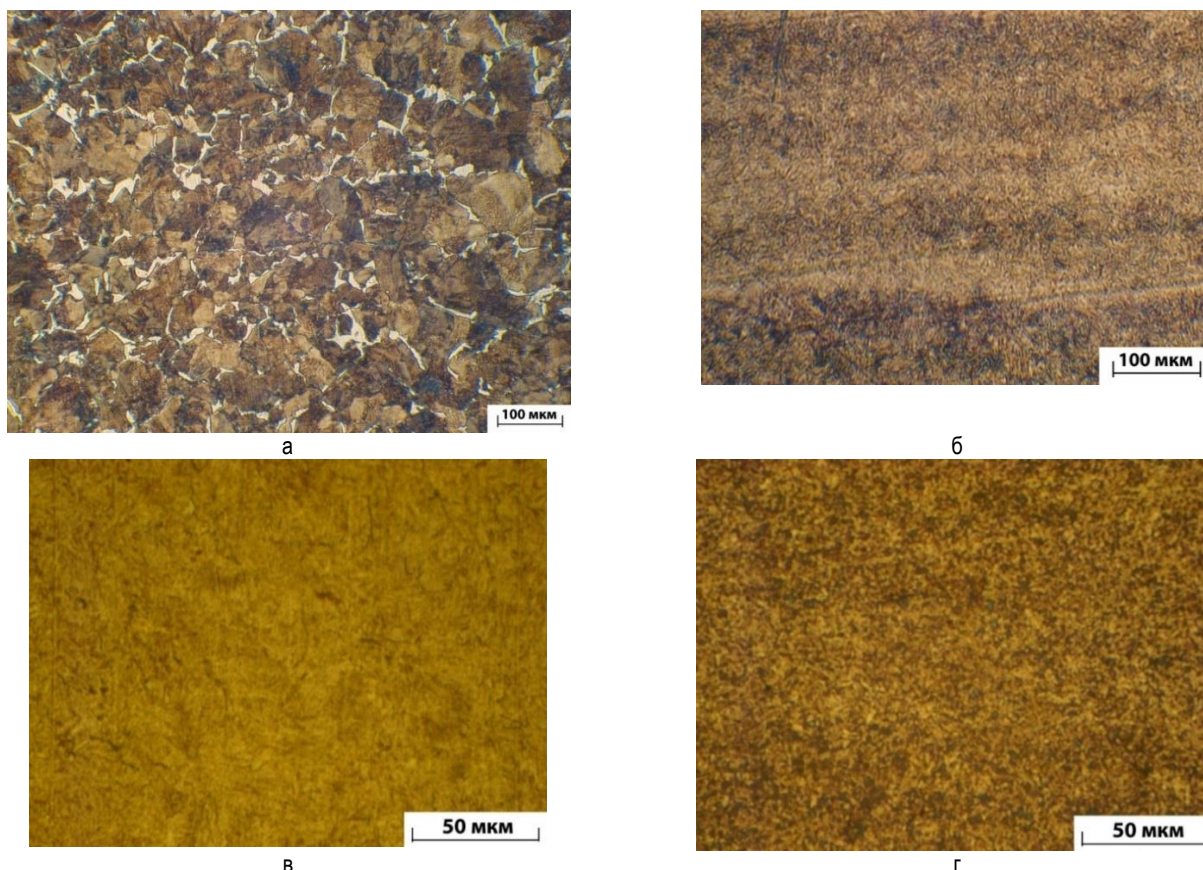


Рисунок 5 – Микроструктура стали 40X в исходном состоянии (а), после объемной закалки (б) и отпуска при температурах 400 °C (в) и 600 °C (г)

ЭЛ обработку выполняли развернутым в зону нагрева 10×10 мм² лучом с плотностью мощности 2,5 кВт/см², время воздействия составляло 2 с. После выключения ЭЛ источника в результате теплоотвода обеспечивался низкий отпуск закаленных участков. При ЭЛЗ формировалась зона закалки параболической формы в поперечном сечении. По глубине зона структурно неоднородна и состояла из нескольких участков (рисунок 6). Мартенсит в поверхностных слоях мелкозернистый, его дисперсность возрастает по мере удаления от поверхности, что объясняется существованием нормального к поверхности градиента температур. Наблюдалось содержание остаточного аустенита, полученного при охлаждении из гомогенного аустенита. Ближе к исходному металлу наряду с мартенситом содержались элементы феррита. Нижняя граница зоны ЭЛЗ определяется температурой нагрева до точки перехода Ас1. Ниже сталь имеет исходную структуру после отпуска.

На рисунке 7 показано распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя в стали 40X после ЭЛЗ образцов с различными режимами предварительной обработки. Твердость на поверхности образцов – 56–61 HRC (таблица 3), микротвердость упрочненного слоя – 6,1–8,5 ГПа, при переходе к основе уменьшалась до 2,3–3,5 ГПа в зависимости от исходной твердости материала. Для профиля микротвердости по глубине характерны плато микротвердости. Глубина закаленных слоев в зависимости от режима предварительной обработки – 1000–1400 мкм. Пониженную микротвердость у поверхности образцов можно объяснить как обезуглероживанием стали при предварительной термической обработке, так и тем, что для приповерхностного слоя металла возможность для охлаждения с достаточно высокой скоростью ограничена. Твердость мартенситной структуры стали 40X после ЭЛЗ превышала твердость мартенсита, получаемого объемной закалкой. Как известно, для повышения прочностных свойств стали 40X уменьшают температуру отпуска её. Отпуск при 200 °C позволяет увеличить пределы текучести и прочности, твердости до 552 НВ (что соответствует HRC 55), но со снижением ударной вязкости стали [22].

Таблица 3 – Твердость образцов из стали 40X после ЭЛЗ в зависимости от режима предварительной термообработки

Температуры предварительной термообработки, °C		Твердость, HRC	
закалка	отпуск	после отпуска	после ЭЛЗ
850	400	37	59
850	500	32	61
850	600	22	56

Исходя из анализа результатов металлографических и дюрOMETрических исследований видно, что для исходной структура троост-сорбита стали 40X при ЭЛЗ достигается наиболее высокое значение твердости закаленного слоя. За одинаковое время сталь с более мелкодисперсной структурой (сорбит) образует после ЭЛЗ более мелкодисперсный мартенсит, однако структура троостита обладает большей теплопроводностью по сравнению с сорбитом [23]. Кроме того, положение критических точек Ас1 и Ас3 при скоростном нагреве зависит от степени дисперсности сталей [20]. Структура перлита менее дисперсна, чем сорбита, троостита, мартенсита, и соответственно точки Ас1 и Ас3 смещаются вверх. При нагреве за одинаковое время сталь со структурой перлита нагревается до меньшей глубины по сравнению с остальными состояниями. Таким образом, наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троост-сорбитная структура, полученная после предварительной закалки с 850 °C и последующего отпуска при температуре 500 °C.

Такая последовательность объемного термоупрочнения и поверхностной ЭЛЗ даёт возможность повысить вязкость, снизить твердость сердцевины и существенно (до HRC 61) увеличить твердость рабочих участков изделия с получением упрочненного слоя глубиной порядка 1 мм. В целом такое сочетание свойств приводит к улучшению эксплуатационных характеристик изделий. Методы ЭЛЗ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими вариантами модифицирования свойств поверхности, в том числе с широко применяемым видом скоростной закалки – ТВЧ нагревом, в частности возможностью упрочнения локальных, в том числе заглубленных участков.

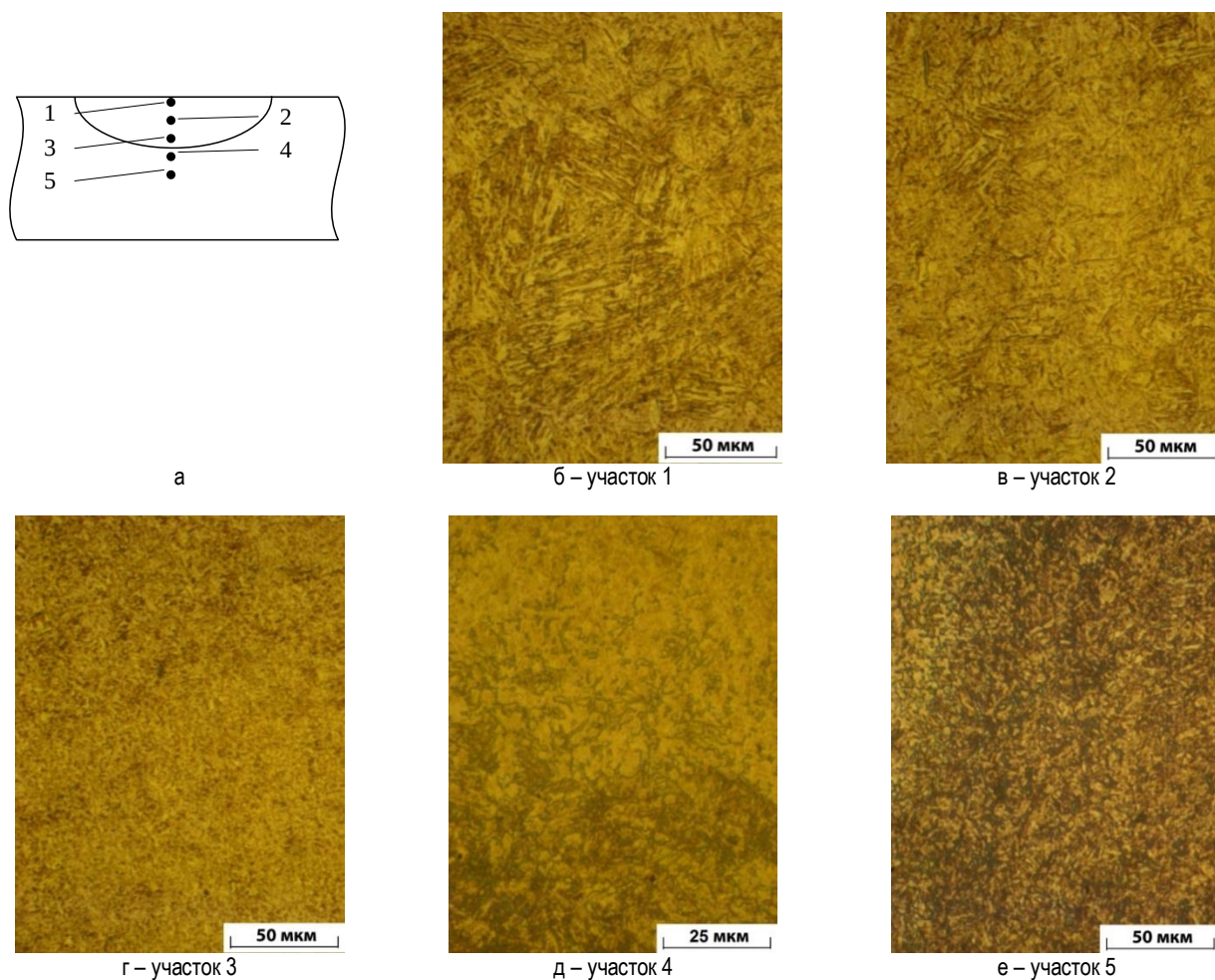


Рисунок 6 – Схема расположения участков регистрации (а) и микроструктуры (б–е) подвергнутых ЭЛЗ образцов из стали 40Х после предварительной объемной закалки при 850 °С и отпуска при 500 °С

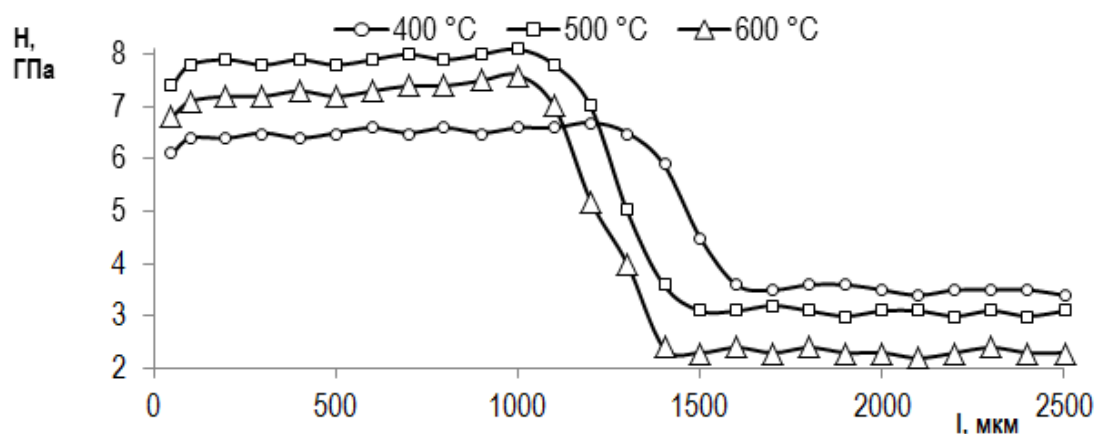


Рисунок 7 – Распределение микротвердости после ЭЛЗ по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 40Х с различными исходными структурами (показана температура отпуска после объемной закалки)

Заключение

На основании конечно-элементного моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов при скоростном нагреве сталей предложен подход к выбору рациональных значений параметров электронно-лучевой закалки (ЭЛЗ). Полученными диаграммами распределения температур в различные моменты времени показана существенность влияния геометрии обрабатываемой детали и продолжительности воздействия на характер распространения тепла в заготовке при её нагреве и соответственно на конфигурацию закаленной зоны.

Характеристики упрочненной при ЭЛЗ стали зависят от предварительной подготовки структуры и теплофизических свойств материала. Для широко применяемой стали 40Х наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троосто-сорбитная структура, получаемая после предварительной закалки с 850 °С и отпуска при температуре 500 °С. ЭЛЗ поверхности даёт возможность существенно (до HRC 61) увеличить твердость рабочих участков изделия на глубину до 1 мм с сохранением высокой пластичности сердцевины, что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик изделий.

Список цитированных источников

1. Рыкалин, Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Schiller, S. Electron beam technology / S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 508 p.
3. Friedel, K. Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe u warunkach głębokiej penetracji / K. Friedel // *Prac. Nauk. Inst. Technol. Elektron. PWR.* – 1983. – № 27. – 67 s.
4. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.]; под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Навукова думка, 1987. – 256 с.
5. Шипко, А. А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск: Наука и техника, 1995. – 280 с.
6. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 319 с.
7. Патон, Б. Е. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокореакционных металлов / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин. – Киев: Навукова думка, 2008. – 312 с.
8. Zenker, R. Modern thermal electron beam processes - research results and industrial application / R. Zenker // *Metallurgia Italiana.* – 2009. – Vol. 101. – P. 1–8.
9. Dutta, B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, F. H. Froes // *Metal Powder Report.* – 2017. – Vol. 72. – P. 96–106.
10. Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing / D. Kovalchuk, V. Melnyk, I. Melnyk, B. Tugai // *Electrotechnica&Electronica.* – 2016. – № 5–6. – P. 36–42.
11. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий / В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, А. Д. Губко // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 169–180.
12. A substrate material and thickness influence on the 3D-printing of Ti-6Al-4V components via wire-feed electron beam additive manufacturing / K. N. Kalashnikov, A. V. Chumaevskii, T. A. Kalashnikova, E. A. Kolubaev // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2022. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 840–852.
13. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник / А. В. Щербаков, Д. А. Гапонова, А. П. Слива [и др.]; ред. А. Г. Григорьянц, В. К. Драгунов; Национальный исследовательский ун-т "МЭИ". – М.: Изд-во МЭИ, 2022. – 675 с.
14. Ерохин, А. А. Об эффективном коэффициенте полезного действия процесса проплавления электронным лучом / А. А. Ерохин, В. Ф. Резниченко, А. Ф. Худышев // *Физика и химия обработки материалов.* – 1970. – № 3. – С. 131–133.
15. Зуев, И. В. Эффективный к.п.д. электронно-лучевого нагрева / И. В. Зуев, Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов // *Физика и химия обработки материалов.* – 1976. – № 1. – С. 22–25.
16. Hanson, P. Computer controlled electron beam treating effective for hardening steel / P. Hanson // *Ind. Heat.* – 1984. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 17–20.
17. Bartel, R. Oberflächenschmelzbehandeln mit Elektronenstrahlen / R. Bartel, M. Muller // *Schweisstechnik.* – 1986. – Bd. 36, N 11. – S. 489–491.
18. Stähli, G. Traitement thermique rapide / G. Stähli // *Traitement Thermique.* – 1986. – Vol. 199. – P. 43–53.
19. Bashenko, V. The electron beam alloy hardening factors / V. Bashenko, M. Radchenko // 4-ème Colloq. int. soudage et fusion faisceau electrons et laser. Cannes. – 1988. – P. 515–522.
20. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, Н. Ф. Черненко. – Киев: Навукова думка, 1973. – 336 с.
21. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
22. Сталь 40Х: характеристики. – URL: <https://atissteel.ru/stal-40h-harakteristiki> (дата обращения: 20.02.2025).
23. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – М.: Металлургия, 1980. – 295 с.

References

1. Rykalin, N. N. Osnovy elektronno-luchevoj obrabotki materialov / N. N. Rykalin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 239 s.
2. Schiller, S. Electron beam technology / S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 508 p.
3. Friedel, K. Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe u warunkach głębokiej penetracji / K. Friedel // *Prac. Nauk. Inst. Technol. Elektron. PWR.* – 1983. – N 27. – 67 s.
4. Elektronno-luchevaya svarka / O. K. Nazarenko, A. A. Kajdalov, S. N. Kovbasenko [i dr.]; pod red. B. E. Patona. – Kiev: Navukova dumka, 1987. – 256 s.
5. SHipko, A. A. Uprochnenie stalej i splavov s ispol'zovaniem elektronno-luchevogo nagreva / A. A. SHipko, I. L. Pobel', I. G. Urban. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1995. – 280 s.
6. Elektronno-luchevaya obrabotka materialov / V. N. Alekhovich, A. V. Alifanov, A. I. Gordienko, I. L. Pobel'. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2006. – 319 s.
7. Paton, B. E. Elektronno-luchevaya plavka tugoplavkih i vysokoreakcionnyh metallov / B. E. Paton, N. P. Trigub, S. V. Ahonin. – Kiev: Navukova dumka, 2008. – 312 s.
8. Zenker, R. Modern thermal electron beam processes - research results and industrial application / R. Zenker // *Metallurgia Italiana.* – 2009. – Vol. 101. – P. 1–8.
9. Dutta, B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, F. H. Froes // *Metal Powder Report.* – 2017. – Vol. 72. – P. 96–106.
10. Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing / D. Kovalchuk, V. Melnyk, I. Melnyk, B. Tugai // *Electrotechnica&Electronica.* – 2016. – № 5–6. – R. 36–42.
11. Poluchenie metallicheskih izdelij s primeneniem elektronno-luchevyh additivnyh tekhnologij / V. G. Zaleskij, I. L. Pobel', A. A. Bakinovskij, A. D. Gubko // *Vest. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekh. nauk.* – 2018. – T. 63, № 2. – S. 169–180.
12. A substrate material and thickness influence on the 3D-printing of Ti-6Al-4V components via wire-feed electron beam additive manufacturing / K. N. Kalashnikov, A. V. Chumaevskii, T. A. Kalashnikova, E. A. Kolubaev // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2022. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 840–852.
13. Additivnye tekhnologii v proizvodstve metallicheskih konstrukcij: uchebnik / A. V. SHCHerbakov, D. A. Gaponova, A. P. Sliva [i dr.]; red. A. G. Grigor'yanc, V. K. Dragunov; Nacional'nyj issledovatel'skij un-t "MEI". – M.: Izd-vo MEI, 2022. – 675 s.
14. Erohin, A. A. Ob effektivnom koeficiente poleznogo dejstviya processa proplavleniya elektronnym luchom / A. A. Erohin, V. F. Reznichenko, A. F. Hudyshev // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* – 1970. – № 3. – S. 131–133.
15. Zuev, I. V. Effektivnyj k.p.d. elektronno-luchevogo nagreva / I. V. Zuev, N. N. Rykalin, A. A. Uglov // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* – 1976. – № 1. – S. 22–25.
16. Nanson, R. Computer controlled electron beam treating effective for hardening steel / R. Nanson // *Ind. Neat.* – 1984. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 17–20.
17. Vartel, R. Oberflächenschmelzbehandeln mit Elektronenstrahlen / R. Vartel, M. Muller // *Sshweissteshnik.* – 1986. – Vd. 36, N 11. – S. 489–491.
18. Stähli, G. Traitement thermique rapide / G. Stähli // *Traitement Thermique.* – 1986. – Vol. 199. – P. 43–53.
19. Bashenko, V. The electron beam alloy hardening factors / V. Bashenko, M. Radchenko // 4-ème Solloq. int. soudage et fusion faisceau eletrons et laser. Sannes. – 1988. – P. 515–522.
20. Fizicheskie osnovy elektrotermicheskogo uprochneniya stali / V. N. Gridnev, YU. YA. Meshkov, S. P. Oshkaderov, N. F. CHernenko. – Kiev: Navukova dumka, 1973. – 336 s.
21. Sorokin, V. G. Marochnik stalej i splavov / V. G. Sorokin, A. V. Volosnikova, S. A. Vyatkin. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 640 s.
22. Stal' 40H: harakteristiki. – URL: <https://atissteel.ru/stal-40h-harakteristiki> (data obrashcheniya: 20.02.2025).
23. Livshic, B. G. Fizicheskie svojstva metallov i splavov / B. G. Livshic, V. S. Kraposhin, YA. L. Lineckij. – M.: Metallurgiya, 1980. – 295 s.

Материал поступил 20.02.2025, одобрен 06.03.2025,
принят к публикации 06.03.2025