

## ЗАКАЛКА СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫПУЩЕННЫМ В АТМОСФЕРУ

Голковский М.Г., Вайсман А.Ф., Батаев В.А.

Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия. e-mail: dsm@nstu.nsk.su

**Аннотация.** Исследован процесс поверхностного электронно-лучевого упрочнения цилиндрических изделий из стали 45. Проанализированы технологические параметры, влияющие на качество поверхностной закалки. Показана определяющая роль времени воздействия электронного пучка на материал.

### 1. Релятивистский электронный пучок как источник энергии для закалки стали.

В Институте ядерной физики СО РАН разработаны несколько типов промышленных ускорителей, позволяющих выпускать в атмосферу мощный концентрированный электронный пучок (ЭП). При закалке цилиндрических изделий энергия электронов в пучке устанавливается в диапазоне значений 1...1,6 МэВ. Мощность ЭП достигает 100 кВт. Такой пучок позволяет производить закалку цилиндрических стальных деталей в широком диапазоне диаметров без использования охлаждающих жидкостей (за счет явления самозакалки). Процесс обладает высокой эффективностью и производительностью и обеспечивает высокое качество закаленного слоя. Поскольку в большинстве случаев шероховатость поверхности в результате закалки не изменяется, данная операция может быть финишной.

Эффективность нагрева материала электронным пучком составляет 90 %, а полная эффективность ускорителя по отношению к потребляемой мощности превышает 60 %. Глубина проникновения электронного пучка (0,5 мм) часто сопоставима с требуемой глубиной закаленного слоя. При максимальной концентрации вводимой мощности (диаметр пучка 1 мм, мощность 100 кВт) поверхностный слой стальной детали прогревается на глубину 0,4 мм до температуры плавления за  $6 \cdot 10^{-5}$  с.

Диаметр электронного пучка в плоскости выпускного отверстия составляет около 1 мм. С увеличением длины пролёта в атмосфере он возрастает как вследствие рассеяния пучка на молекулах воздуха, так и вследствие его исходной расходимости с углом около 0,05 радиан.

### 2. Особенности процесса.

В процессе обработки быстро вращающаяся цилиндрическая деталь поступательно перемещается под пучком вдоль оси со скоростью  $v$ . Таким образом пучок описывает на поверхности детали спираль, шаг которой во много раз меньше диаметра пучка. Поэтому фактически на поверхности образуется прогретая зона в форме кольца, перемещающегося вдоль оси детали. Поверхностный слой быстро нагревается электронным пучком, а затем быстро охлаждается за счёт оттока тепла в глубь материала. В результате на поверхности изделия образуется упрочнённый слой.

При закалке разнообразных цилиндрических деталей энергия электронов в пучке выбирается в сравнительно узком диапазоне. Температуропроводность и теплоемкость материала детали при обработке ЭП также можно считать слабо изменяющимися. Кроме того, при проведении исследований диаметр детали был достаточно велик в сравнении с толщиной закаленного слоя (образец 3, табл. 1, является исключением). Таким образом, исходя из вышесказанного, только два переменных параметра определяют температурно-временные зависимости в материале: максимальная температура, достигающаяся в поверхностном слое ( $T_{\text{макс}}$ ) и время воздействия пучка ( $t_0$ ). Под последним понимается полное время воздействия пучка на каждую точку поверхности материала:  $t_0 = d/v$ , где  $d$  – гауссов диаметр пучка,  $v$  – скорость поступательного перемещения детали вдоль оси её вращения.

Все остальные параметры процесса могут быть вычислены после выбора значений  $T_{\text{макс}}$  и  $t_0$ . Причём, свойства закалённой зоны в основном определяются величиной  $t_0$ , поскольку температура  $T_{\text{макс}}$  выбирается примерно одной и той же для всех режимов закалки. С учётом сказанного, исследования были проведены во всём диапазоне значений параметра  $t_0$ , в котором возможна закалка электронным пучком. Кроме того, для всех исследованных режимов с использованием специальной математической модели [1], были определены температурно-временные зависимости на разных глубинах от поверхности материала. Параметры восьми характерных режимов во всём диапазоне значений времени  $t_0$  приведены в табл. 1 с указанием соответствующих марок сталей. При проведении экспериментов энергия электронов в пучке устанавливалась равной 1,55 МэВ для образцов 1, 2 и 1,4 МэВ - для всех остальных.

Режимы обработки электронным пучком в соответствии с металлографическими особенностями закалённой зоны удобно разделить на три типа. По времени обработки  $t_0$  они были названы быстрыми, средними и медленными режимами. Соответствующие интервалы значений  $t_0$  для образцов из стали 45 приведены ниже.

Средние значения твёрдости на быстрых и средних режимах обработки совпадают с твёрдостью, достигаемой традиционными методами закалки. Однако при концентрации углерода в образце, близкой эвтектоидной, твердость закалённой зоны может достигать 11000 МПа, что несколько выше значений, достигаемых обычной объёмной закалкой. При обработке на медленных режимах уровень твёрдости понижается по сравнению с быстрыми и средними режимами.

### 3. Быстрые режимы обработки.

Быстрые режимы обработки соответствуют времени воздействия пучка  $t_0 \leq 0,1$  с. На быстрых режимах были закалены образцы 1, 2 и 3 (табл. 1). Для выравнивания исходной структуры материала образец 1 подвергался предварительной закалке от 850 °С с последующим отпуском при 600 °С. Обработка этого образца состояла в нанесении электронным пучком спиральной дорожки на цилиндрической поверхности образца, таким образом, что два соседние витка не перекрывались. С помощью такого специального режима обработки были исследованы свойства закалённой зоны на предельно малых временах воздействия пучка. В поперечном сечении одиночной дорожки на образце 1 закалённая зона, имеет грушеобразную форму. Такая форма объясняется расширением исходного узкого пучка в глубине материала из-за отклонения траекторий каждого электрона от исходного направления. Вследствие наклона траекторий электронов максимум энерговыделения располагается на глубине 0,2 мм под поверхностью материала. На поверхности образца 2, в противоположность образцу 1, был образован сплошной закалённый слой, сформированный за счёт перекрытия соседних дорожек. На этом режиме максимум температуры достигался на поверхности образца. Это объясняется существенным возрастанием времени воздействия пучка в режиме 2, и соответственно выравниванием температур в процессе ввода тепла в прогреваемый слой материала. При обработке на быстрых режимах в поверхностных слоях образцов 1 и 2 формируются мартенситные зоны с резким переходом к основному металлу.

Охлаждение образцов в процессе закалки цилиндрических образцов электронным пучком проходит в две стадии. На первой стадии тепло быстро распространяется вглубь перпендикулярно поверхности детали. На этой стадии происходит выравнивание температур в поперечном сечении цилиндрической детали. На следующей стадии, тепло распространяется вдоль оси цилиндра в обоих направлениях от прогретого участка детали. Для образца 3 температура в конце первой стадии достигала 720 °С. На второй стадии охлаждения она медленно понижалась до точки конца мартенситного превращения  $M_k = 315$  °С. Длительность этой стадии была равна 70 с.

Если бы образец 3 был изготовлен из нелегированной углеродистой стали, скорость его охлаждения была бы недостаточной для образования мартенситной структуры в упрочненном слое. Но, поскольку, использовалась хромомолибденовая сталь AISI 4140 (США) с повышенной прокаливаемостью, в поверхностном слое была сформирована структура

## Характерные примеры закалки цилиндрических образцов

№. Образца	Время воздействия пучка, $t_0$	Диаметр детали, D	Расстояние от выпускного отверстия, h	Поступательная скорость перемещения детали, v	Мощность пучка	Марка стали	Глубина упрочнённого слоя, $\delta_h$
	с	мм	мм	мм/с	кВт		мм
1*	0.0017	49	5	770**	3.6	Сталь 45	0,4
2	0.035	49	5	37	23.4	Сталь 45	0.4
3	0.09	8,5	23	24	6.0	AISI 4140	0.9
4	0.49	38	80	20	33.3	Сталь 45	0.7
5	0.52	Труба 35/23	120	34	46	Сталь 45	0.7
6	0.79	64	80	12,5	39	40X	0.8
7	1.05	100	80	9,4	63	Сталь 45	1.4
8	2.2	200	80	4,4	84	40XH2M	1.8

Примечания: \* см. комментарий к данному образцу в разд. 3;

\*\* это абсолютная скорость перемещения точки на поверхности образца.

мартенсита. На образце были получены высокие прочностные свойства закалённого слоя. Микротвёрдость по Виккерсу возросла в 2,5 раза по сравнению с исходным металлом. Предел выносливости на стали обработанной электронным пучком оказался на 35 % выше, чем на стали не обработанной ЭП.

#### 4. Средние режимы обработки.

Средним режимам обработки соответствует время воздействия пучка на материал в интервале  $0,1 \text{ с} \leq t_0 \leq 0,8 \text{ с}$ . По этим режимам были упрочнены образцы 4, 5 и 6 (табл. 1). Характерная черта средних режимов обработки стали – наличие промежуточного слоя между твердым мартенситным слоем и основным металлом. Это проявляется в плавном понижении твердости в следующем за мартенситным слое. В числе образцов, обработанных на средних режимах, образец 5 представлял собой трубу с толщиной стенки 6 мм. Несмотря на то, что эта труба была изготовлена из нелегированной стали 45, в её поверхностном слое была достигнута средняя микротвёрдость 7000 МПа на глубине до 0,5 мм, при общей глубине закалённого слоя 0,7 мм.

Глубина мартенситной зоны, полученной путем обработки материала электронным пучком, может быть ещё более увеличена за счёт использования легированных сталей с повышенной прокаливаемостью. Мартенситная зона в них шире за счет того, что она занимает место упомянутой ранее промежуточной зоны. Этим объясняется резкий переход по твёрдости между упрочненным слоем и исходным материалом в образце 6, изготовленном из стали 40X. Очевидно, может быть сделан общий вывод об увеличении для сталей с повышенной прокаливаемостью границ интервалов времени воздействия пучка  $t_0$  в упомянутых ранее трёх характерных режимах обработки.

### 5. Медленные режимы обработки.

На медленных режимах были обработаны образцы 7 и 8 (табл. 1). Этим режимам соответствует время  $0,8 \text{ с} \leq t_0 \leq 2 \text{ с}$ . При обработке на медленных режимах образуются смешанные (мартенсит, бейнит, перлит, феррит) структуры с пониженной твёрдостью. Так, средняя твёрдость поверхностного слоя образца 7 равна 5000 МПа. В то же время твёрдость образца 8 остаётся высокой (около 7000 МПа), несмотря на большое значение  $t_0$ . Это можно объяснить использованием стали с высокой прокаливаемостью 40ХН2М. Тем не менее с увеличением времени воздействия пучка  $t_0$  свыше 3 с, для той же стали имеет место снижение толщины мартенситной зоны и увеличение удельной доли промежуточного слоя в упрочненном материале.

Обобщающие данные, отражающие геометрические характеристики упрочненной зоны и удельный поверхностный расход энергии пучка, отражены в табл. 2.

Таблица 2

Обобщающие данные.

	Время воздействия пучка $t_0$ , с			
	$t_0 < 0.03$	0.1	0.8	2.2
Глубина мартенситной зоны, мм	0.4	0.5	1	1.7
Глубина аустенитизации, мм	0.4	0.5	1.2	2.2
Минимально возможный диаметр детали, мм	9	20	50	80
Максимально возможный диаметр детали, мм	150	240	500	750
Поверхностная плотность введённой энергии, кДж/см <sup>2</sup>	0.34	0.8	2.0	3.0

### 6. Заключение.

Обработка стальных изделий электронным пучком, выпущенным в атмосферу, является эффективным, высокопроизводительным способом поверхностного упрочнения. Важнейшим технологическим параметром, определяющим структуру и свойства упрочненного слоя, является время воздействия электронного пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ.

### Литература

1. M. G. Golkovski, S. E. Petrov. Thermal Conditions During the Concentrated E. Beam Steel Hardening. Calculations and Experimental Results. Fifth International Conference on Electron Beam Technologies, - EBT'97, 2-5 June 1997, Varna, Bulgaria.