

218901230



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

IYF -- 88-73

А.Ф. Вайсман, С.Б. Вассерман,
М.Г. Голковский, В.Д. Кедо, Р.А. Салимов

О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ
ПУЧКОМ В АТМОСФЕРЕ

ПРЕПРИНТ 88-73



НОВОСИБИРСК

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.Ф. Вайсман, С.Б. Вассерман,
М.Г. Голковский, В.Д. Кедо, Р.А. Салимов

О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ
ПУЧКОМ В АТМОСФЕРЕ

ПРЕПРИНТ 88-73

НОВОСИБИРСК
1988

О поверхностной закалке стали
концентрированным электронным
пучком в атмосфере

*А.Ф. Вайсман, С.Б. Вассерман,
М.Г. Голковский, В.Д. Кедо, Р.А. Салимов*

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследуются возможности поверхностной закалки стали концентрированным электронным пучком. Эксперименты проводятся с 1985 г. на установке «Клинкер» (ускоритель ЭЛВ-6 с концентрированным выпуском пучка в атмосферу). Описаны режимы обеспечивающие закалку и некоторые характерные свойства закаленного слоя.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Характеристика пучка. Способы закалки	8
2. Свойства закаленной зоны	11
2.1. Температурный режим	11
2.2. Методика исследования закаленной зоны	13
2.3. Особенности закаленной зоны	13
3. Связь между параметрами пучка и геометрическими характеристиками закаленной зоны	18
4. Замечания по технологии закалки электронным пучком	24
4.1. Дорожечная закалка	24
4.2. Полосовая закалка	24
4.3. Закалка с вращением под пучком	26
4.4. Закалка наклонных поверхностей	27
4.5. Поводки	28
4.6. Технологические возможности ускорителей ИЯФ	28
Заключение	30
Литература	31

ВВЕДЕНИЕ

Упрочнение поверхности или отдельных ее участков (деталей и элементов оборудования) в машиностроении, металлургии и других отраслях промышленности относится к числу важнейших технологических процессов, привлекающих внимание многих специалистов. Среди методов упрочнения поверхности наиболее распространенными являются термическая закалка и различные способы химико-термической обработки (цементация, азотирование и др.). Поверхностная термическая закалка по сравнению с химико-термической обработкой требует значительно меньшего времени и является поэтому более предпочтительной.

В настоящее время в машиностроении и металлургии в основном применяется поверхностная закалка с помощью нагрева индукцированными на поверхности токами («индукционная» или ТВЧ-закалка). В широко распространенных процессах закалки ТВЧ выделяющаяся в материале объемная плотность мощности составляет порядка 1 кВт/см^3 , что обеспечивает прогрев до закалочной температуры за десятки секунд. В течение этого времени тепло успевает значительно растечься вглубь материала. Для последующего охлаждения обязательно требуется водяная или масляная ванна или водяной душ («спрейер»), так как иначе не достигается необходимая для закалки скорость охлаждения.

Кроме того, для каждой детали, как правило, создается соответствующей формы индуктор, устанавливаемый вблизи поверхности с заданным зазором.

Использование мощных концентрированных потоков энергии, генерируемых CO_2 -лазерами или ускорителями электронов (плотность выделяемой в материале мощности достигает 10^4 — 10^5 кВт/см³), позволяет осуществлять нагрев поверхностного слоя настолько быстро, что последующее охлаждение прогретого слоя за счет оттока тепла вглубь металла происходит с достаточной для закалки скоростью («самозакалка»). По данным наших экспериментов на ЭЛВ-6, глубина самозакалки достигает 1,5 мм, что во многих случаях достаточно.

В технологии закалки ТВЧ при резком охлаждении жидкостью прогретой на большую глубину детали возникают большие термические напряжения. Кроме того, на начальном этапе охлаждения жидкостью картина тепловых потоков и температурных градиентов сложная, во многом случайная. Процесс охлаждения плохо поддается регулированию и стабилизации. Оба фактора: глубокий прогрев и неравномерное по поверхности охлаждение детали — приводят зачастую к значительным поводам и местным дефектам.

При самозакалке пучком на ту же глубину, что при ТВЧ, энерговыделение на единицу площади значительно меньше, следовательно, температура детали после выравнивания температур в ней тоже значительно меньше. Далее, при самозакалке пучком отток тепла от поверхности всюду проходит одинаково. Минимальный прогрев детали в целом и всюду одинаковое по поверхности охлаждение минимизируют поводки и вероятность появления трещин. Кроме того, время, в течение которого происходит тепловое воздействие, составляет не более долей секунды, что позволяет избежать заметного окисления поверхности.

С учетом перечисленных обстоятельств операция закалки может быть финишной.

Другим важным достоинством технологии поверхностной закалки, использующей концентрированный поток энергии, является легкость формирования нужных зон упрочнения, перестройки режима при переходе на обработку других деталей, автоматизации.

В настоящее время наиболее прогрессирующим методом поверхностной закалки деталей является лазерная технология. Ее применяют ряд фирм США, Японии и других стран. Опытные промышленные участки работают на некоторых автомобильных заводах и в других отраслях машиностроения СССР. Этим занимается несколько отраслевых институтов. Построен лазерный центр АН СССР в Шатуре, который наряду с другими организациями ведет разработку промышленных лазеров.

Между тем, концентрированный электронный пучок в атмосфере при использовании для поверхностной закалки, хотя и уступает лазеру по расходимости пучка и должен иметь радиационную защиту — превосходит его по ряду важных свойств:

- КПД установки много выше;
- возможность быстрой и более надежной (по сравнению с механической) развертки пучка магнитным полем;
- мощности разработанных промышленных ускорителей (десятки кВт) на порядок выше, чем у лазеров промышленного назначения (единицы кВт);
- поверхность детали не нужно чернить (без чернения поверхность металла поглощает только 5—10% энергии луча CO₂-лазера);
- глубина самозакалки выше, так как энергия пучка выделяется в слое торможения, который может равняться или быть соизмеримым с глубиной закалки.

Можно уверенно считать, что во многих случаях применение электронных ускорителей будет более эффективно, чем лазеров.

Концентрированный электронный пучок легко получить в вакууме, и установки этого вида для поверхностной закалки стальных деталей существуют. Однако в силу очевидных недостатков (ограниченные возможности по движению деталей под пучком, их размерам и производительности) широкого распространения это оборудование не получило [1].

Имеются отдельные работы по закалке пучком, выпущенным в атмосферу, через фольгу, например [2], но использовавшиеся в этой работе ускорители имеют мощность пучка до 5 кВт и малую плотность мощности, что не позволяет выйти на режим самозакалки. При облучении получался глубокий прогрев деталей и применялись охлаждающие жидкости.

Совершенно новые возможности появились в связи с разработкой в ИЯФ ускорителей электронов с выпуском концентрированного пучка в атмосферу. Для различных промышленных целей разработаны ускорители непрерывных электронных пучков серии ЭЛВ [3], которые могут работать с выводом концентрированного пучка в атмосферу с энергией электронов до 1,5 МэВ и мощностью пучка до 70 кВт (см. рис. 1). Имеется также опыт работы импульсных ускорителей типа ЭЛИТ с выводом концентрированного пучка в атмосферу, и существует возможность создания мощных промышленных установок с такими пучками на базе имеющихся разработок [4, 5].

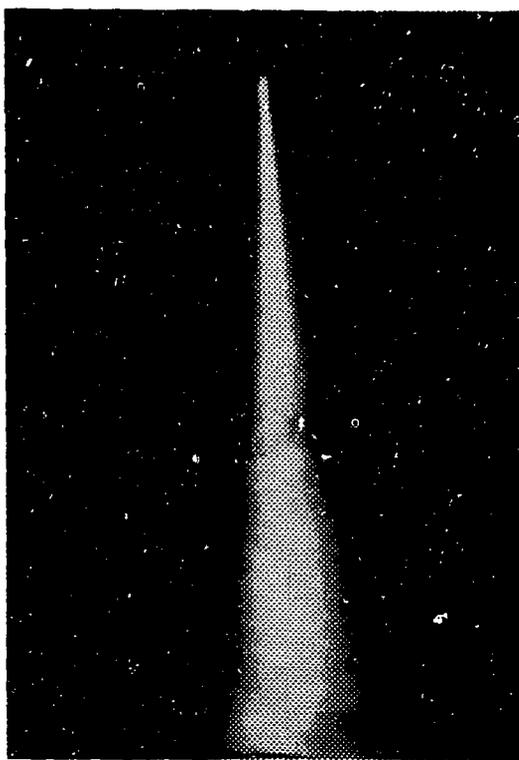


Рис. 1. Фотография пучка в атмосфере.

С 1985 года в ИЯФ СО АН СССР совместно с базирующейся на его территории группой ленинградского института «Гипроцемент» и с привлечением различных заинтересованных промышленных предприятий проводится работа по изучению и освоению технологии поверхностной закалки стали. Эксперименты проводятся на ускорителе ЭЛВ-6. О первых экспериментах сообщалось в докладе [6]. В настоящей работе приводятся результаты, полученные в последние два года. Они содержат различные технологические приемы и режимы закалки, имеющиеся данные о свойствах закаленной зоны, возможности оценочных расчетов различных параметров технологического процесса на основании разработанной методики [7], требования к промышленным ускорителям при применении их для различных видов закалки.

Основная масса результатов была получена на стали марки 45. Отдельные режимы закалки опробованы на сталях других марок.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУЧКА. СПОСОБЫ ЗАКАЛКИ

Использовался непрерывный пучок, создаваемый ускорителем ЭЛВ-6. Энергия электронов устанавливалась в пределах 1—1,4 МэВ, ток пучка не превышал 45 мА. Распределение плотности потока энергии по сечению концентрированного пучка подчиняется закону Гаусса [8]:

$$S = \frac{4IE}{\pi d_n^2} \exp \left[-\frac{4(x^2 + y^2)}{d_n^2} \right], \quad (1.1)$$

где x, y — декартовы координаты на облучаемой поверхности; I — ток пучка; E — энергия электронов (ускоряющее напряжение); d_n — гауссов диаметр пучка.

Величина d_n в зависимости от расстояния до выпускного отверстия h (см. также рис. 2) определяется по эмпирической формуле

$$d_n = 0,1 + 0,55 \cdot 10^{-1} h + \sqrt{\frac{1,4 \text{ МэВ}}{E(\text{МэВ})}} \cdot 0,75 \cdot 10^{-2} h. \quad (1.2)$$

Здесь d_n и h измеряются в см, E в МэВ.

Распределение объемной плотности мощности $u(z)$, выделяющейся в ходе облучения внутри материала, иначе называемое дозой кривой, показано на рис. 3 [9].

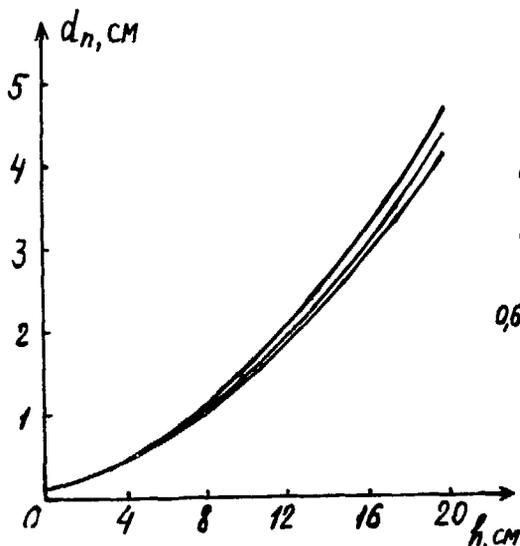


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка от расстояния пролета электронов в атмосфере:

1 — $E=1$ МэВ; 2 — $E=1,2$ МэВ; 3 — $E=1,4$ МэВ;

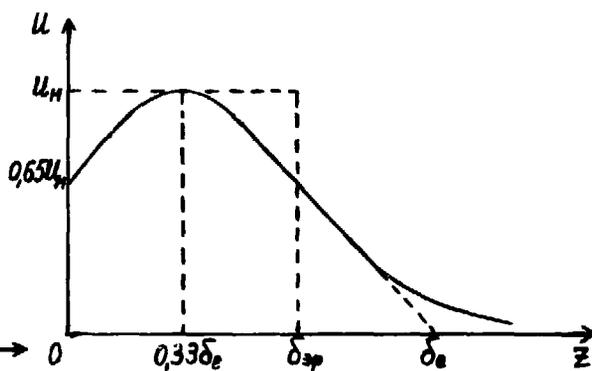


Рис. 3. Распределение объемной плотности мощности в материале при облучении.

Величина δ_e , полученная продолжением прямолинейной части дозной кривой, — так называемый экстраполированный пробег — находится из соотношения

$$\delta_e = \frac{R}{\rho} = \frac{0,54 E - 0,16}{\rho}, \quad (1.3)$$

где R — экстраполированный пробег в единицах массовой толщины, г/см²; E выражена в МэВ.

Глубину проникновения электронов для наших целей удобно выражать эффективным пробегом $\delta_{эф}$, определяемым как

$$\delta_{эф} = \frac{\int_0^{\infty} U(z) dz}{U_m}. \quad (1.4)$$

Для дозной кривой с достаточной точностью выполняется соотношение

$$\delta_{эф} = 0,65 \delta_e. \quad (1.5)$$

Далее перечислим опробованные способы закалки:

- дорожечная закалка, когда деталь линейно перемещается под неподвижным пучком;
- полосовая закалка: деталь также линейно перемещается под пучком, но пучок сканирует в направлении, перпендикулярном перемещению детали. Сканирование пучка достигается применением электромагнитной развертки;
- закалка вращающихся под неподвижным пучком деталей: одновременно с вращением производится поступательное перемещение детали вдоль оси вращения.

Форма границы закаленного слоя для названных трех способов закалки в сечении, перпендикулярном направлению движения образца, показана на рис. 4.

Для краткости ниже, если не оговорено особо, имеется в виду дорожечная закалка. Переход к другим способам прост, а особенности их будут приведены в разделе 4.

В дорожечной закалке поверхностная плотность энергии после интегрирования (1.1) по времени воздействия пучка

$$\omega(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{I E}{v d_n} \exp\left[-\frac{4y^2}{d_n^2}\right], \quad (1.6)$$

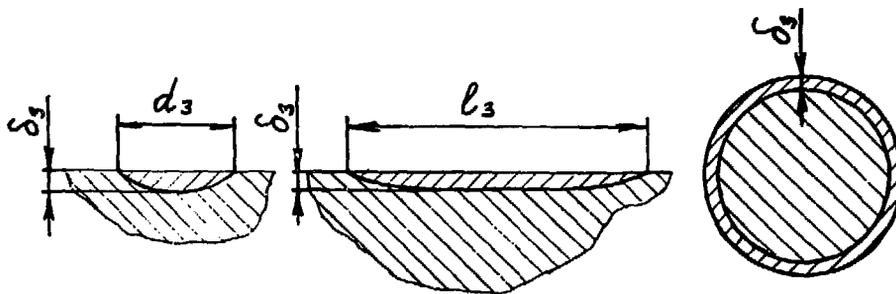


Рис. 4. Форма поперечного сечения закаленной зоны при разных способах закалки: а — дорожечная закалка; б — полосовая закалка; в — квазиколецевая закалка.

где y — координата на закаливаемой поверхности, перпендикулярная направлению перемещения образца под пучком; v — скорость перемещения образца.

В полосовой закалке

$$\omega = \frac{IE}{v l_{\text{н}}}, \quad (1.7)$$

где $l_{\text{н}}$ — эффективная ширина полосы.

2. СВОЙСТВА ЗАКАЛЕННОЙ ЗОНЫ

2.1. Температурный режим

В зоне закалки за время порядка времени облучения $t_{\text{об}}$ осуществляется нагрев до некоторых максимальных (пиковых) температур, отличающихся от точки к точке и лежащих в некотором интервале. Начало интервала пиковых температур в точках закаленной зоны ориентировочно оценено в настоящей работе как 1100°C (см. разд. 2.3. и разд. 3, форм. (3.5), (3.6)). Конец интервала пиковых температур не должен превышать температуру плавления стали (для стали 45 около 1400°C), поскольку режимы с плавлением нецелесообразны (см. разд. 2.3. пп. 3 и 4).

Режимы закалки по времени воздействия пучка можно разделить на три вида, согласно табл. 1.

Таблица 1

Температурные режимы закалки для энергии электронов
 $E = 1 \div 1,4$ МэВ

Наименование режимов		Время облучения, $t_{об}$	Начальная скорость охлаждения $(dT/dt)_0$	Время охлаждения до температуры $T_{охл}$
		с	град./с	с
Адиабатические		$< 0,01$	$> 15 \cdot 10^3$	$< 0,5$
Неадиабатические	Быстрые	$0,01 - (0,1)$	$15 \cdot 10^3 - (4 \cdot 10^3)$	$0,5 - (2)$
	Средние	$(0,1) - 1$	$(4 \cdot 10^3) - 500$	$(2) - 15$
Медленные		$1 - 2 \dots 3$	$500 - 200$	$15 - 50$

Адиабатическими названы режимы, при которых за время облучения тепло оттекает от слоя, куда оно внесено пучком, не более, чем на 30%.

Неадиабатическими названы режимы, при которых за время облучения успевает произойти растекание тепла, но еще обеспечивается качественная самозакалка. Разбиение временного диапазона неадиабатических режимов на два поддиапазона представляется целесообразным ввиду некоторых качественных различий в закаленной зоне, соответствующих указанным поддиапазонам (см. разд. 2.3, пп.3 и 5). Время облучения, разграничивающее поддиапазоны, — предмет дальнейших исследований. По отдельным фотографиям микрошлифов можно привести лишь его предположительное значение (указано в табл. 1 в скобках так же, как и соответствующие начальная скорость $(dT/dt)_0$ и время охлаждения $t_{охл}$).

Медленными названы переходные режимы, при которых происходит постепенное ослабление степени закалки с образованием промежуточных структур.

Приведенные в табл. 1 значения начальной скорости и времени охлаждения получены с помощью оценочного расчета [7]. Время охлаждения отсчитывается от пиковой температуры до температуры начала мартенситного превращения T_m . Для стали 45 $T_m \approx 300^\circ\text{C}$ [10, 11]. Величина $t_{охл}$ указана для поверхности образца, где она наибольшая.

По литературным данным [10, 11] для образования мартенситной фазы в стали 45, начальная скорость охлаждения $(dT/dt)_0$ и

время охлаждения $t_{\text{охл}}$ должны подчиняться условиям:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_0 \geq 200 \frac{\text{град.}}{\text{с}}; \quad t_{\text{охл}} \leq 10 \text{ с.}$$

2.2. Методика исследования закаленной зоны

Поверхность образцов перед облучением предварительно полировалась. После облучения производилась дополнительная полировка для снятия потемнения. На полированной поверхности границы закаленной зоны прослеживаются, но слабо. При этом закаленная область получается более блестящей. Для четкого выявления границ применялось травление раствором 4% HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Твердость измерялась методом Виккерса при нагрузке 10 кг. На отдельных образцах измерялась микротвердость и проводились металлографические исследования.

В работе использовались протоколы металлографических исследований метрологической службы ИЯФ, лабораторий заводов: Тяжстанкогидропресс им. Ефремова и Авиационный им. Чкалова, г. Новосибирск; КАМАЗ г. Набережные Челны; Ярославский моторный завод.

2.3. Особенности закаленной зоны

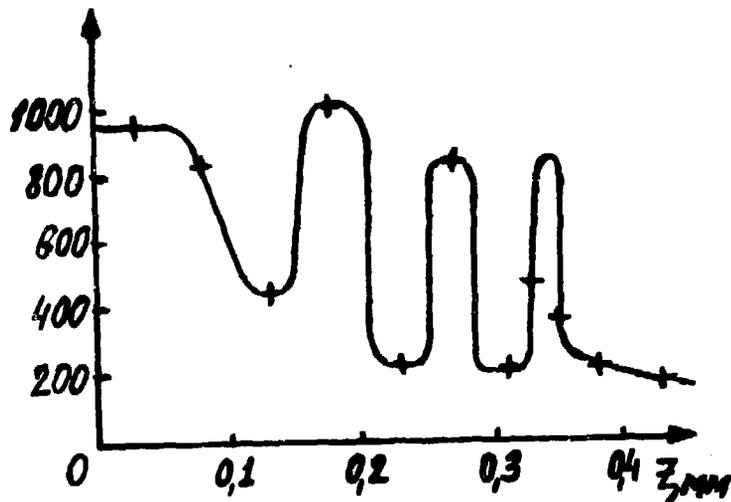
1. При быстрых режимах облучения ($t_{\text{об}} < 0,1$ с) на микрошлифах при увеличении $\times 500$ граница между закаленной и незакаленной областями представляет собой практически линию нулевой толщины. При этом граница закалки делит даже отдельные зерна.

2. Отсутствие переходной зоны на быстрых режимах подтверждается также замерами твердости. Твердость по Виккерсу не меняется от поверхности до границы зоны закалки и составляет во всех случаях $HV_{10\text{кг}} = 780 \pm 50$ кгс/мм². При измерении же микротвердости наблюдается большой разброс значений, что объясняется чередованием в зоне закалки мартенситных и ферритных зерен (рис. 5). Максимальные значения микротвердости мартенситных зерен не меняются вплоть до расстояний порядка 50 мкм от границы зоны закалки, где твердость несколько понижается. Но размер 50 мкм уже сопоставим с размером отпечатка при замерах микротвердости.

На основании вида микрошлифов, замеров микротвердости и



a



b

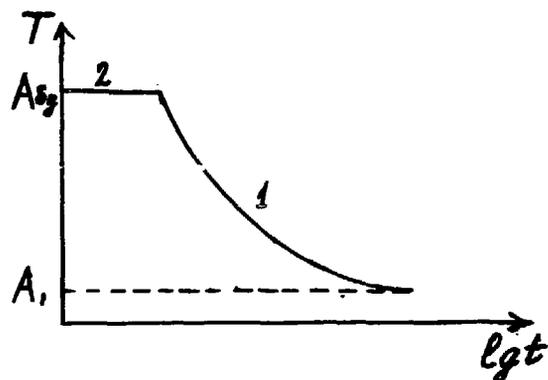
Рис. 5. Зона закалки в одном из «быстрых» режимов (квазиколецевой режим, $t_{об} = 0,04$ с);
 а — участок зоны закалки со следами замеров микротвердости, $\times 100$; б — соответствующее распределение микротвердости.

сопоставления экспериментальных данных по размерам закаленной зоны с оценочным расчетом [9] можно высказать предположение, что существует граничная температура закалки $T_3 \approx 1100^\circ\text{C}$, выше которой аустенизация перлита происходит за время, меньшее нескольких миллисекунд (время экспозиции при температуре выше T_3 в адиабатических режимах), и ниже которой она не происходит и за существенно большие времена порядка нескольких десятых секунды (время экспозиции при температуре выше T_3 в медленных режимах).

В литературе имеются данные о сокращении времени полной аустенизации t с повышением температуры T стали от времени порядка минут при температуре около 800°C до порядка 1 с при температуре около 900°C . Для времен, существенно меньших 1 с, по литературным данным, начиная с некоторой критической температуры, возможен практически мгновенный переход феррита в аустенит (см. рис. 6), воспроизводящий одну из кривых рис. 24.6 из [13]. Подобное поведение объясняют [12, 13] бездиффузионным (спонтанным) $\alpha \rightarrow \gamma$ превращением в ферритных составляющих зерен перлита.

Рис. 6. Схематичная диаграмма кинетики образования аустенита при нагреве в доэвтектоидной стали (воспроизведено из [13]):

1 — начало диффузионного образования аустенита; 2 — бездиффузионное превращение α феррита в γ твердый раствор.



3. Ферритная сетка, существующая в основном материале, сохраняется без изменений в части закаленной зоны, примыкающей к ее дну (см. рис. 7). Толщина слоя с ферритной сеткой в зоне закалки тем больше, чем меньше время облучения $t_{об}$, а при некоторых режимах облучения, относящихся к быстрым (см. табл. 1), отмечено сохранение ферритной сетки на всей толщине закаленной зоны.

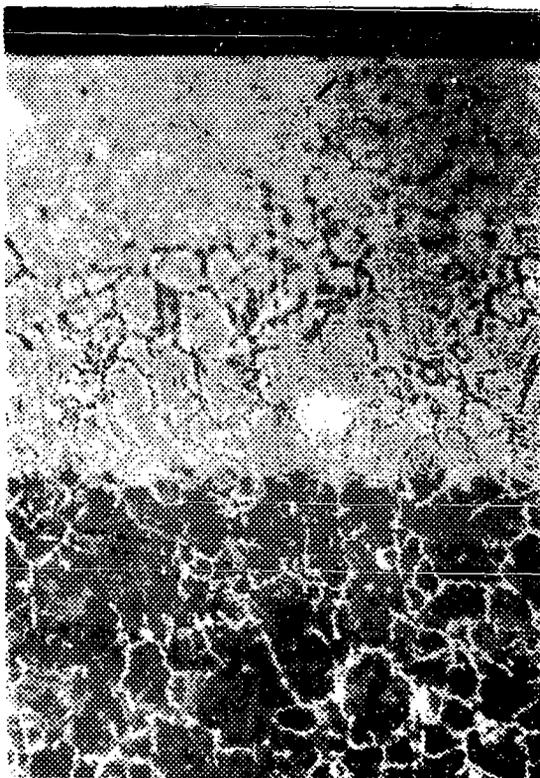


Рис. 7. Закаленная зона для одного из средних по времени облучения режимов: $t_{06} = 0,15$ с. Увеличение $\times 100$. Видно, что ферритная сетка простирается от дна зоны закалки примерно на половину ее толщины. Материал: сталь 45.

Микротвердость мартенситных областей, образовавшихся на месте перлитных зерен исходной структуры, всюду около 1000 кгс/мм^2 ; микротвердость ферритной сетки не изменяется в результате закалки и составляет около 250 кгс/мм^2 . Это свидетельствует о том, что диффузия углерода за пределами перлитных зерен в феррит не успевает происходить и, соответственно, не образуется аустенитной структуры для последующей закалки в мартенсит. Зато в пределах исходных перлитных зерен образуется мелкоигольчатый мартенсит.

Можно предположить, что структура, когда в мягкую ферритную сетку погружены твердые мартенситные области, может оказаться выгодной с точки зрения эксплуатационных свойств: сочетания износостойкости и вязкости.

Естественно, в зоне переплава растворение ферритной сетки всегда происходит. Твердость в зоне переплава заметно не отличается от средней твердости твердозакаленных областей. В быстрых режимах по растворению ферритной сетки можно определить гра-

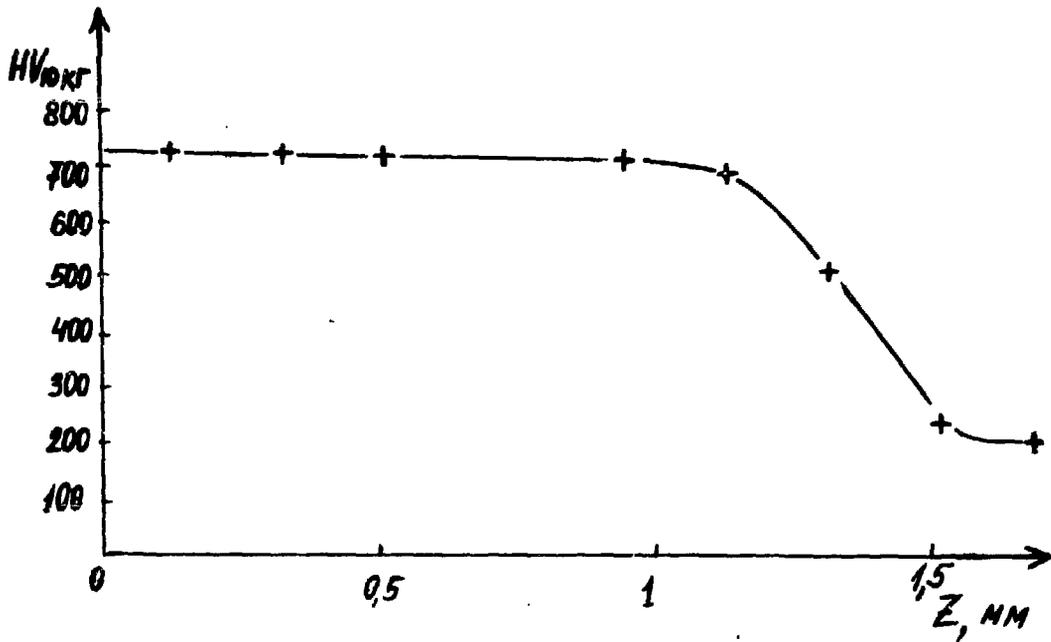


Рис. 8. Распределение твердости HV_{10kgf} по глубине зоны закалки для режима с $t_{06} = 1$ с.

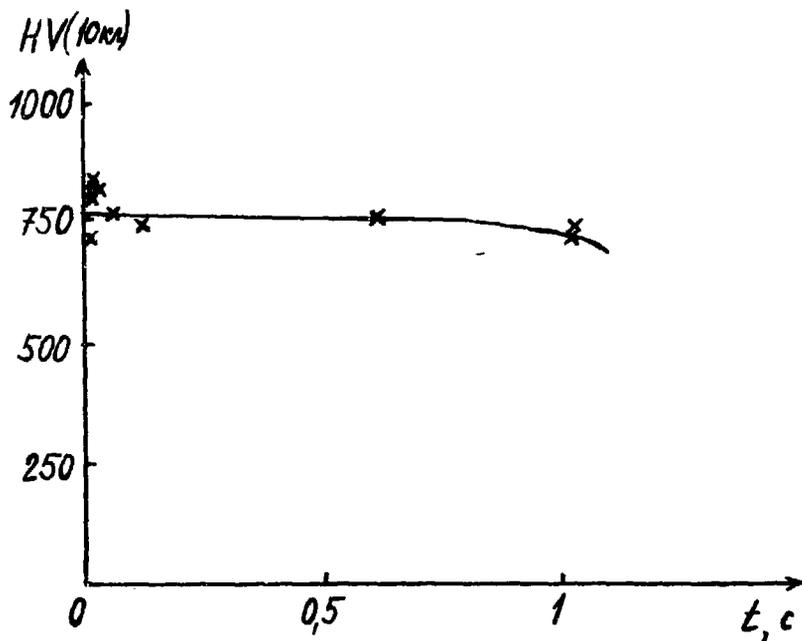


Рис. 9. Твердость по Виккерсу (нагрузка 10 кгс) на поверхности образцов из стали 45, закаленных при разных временах облучения t_{06} .

ницу зоны переплава. Закалка с переплавом нецелесообразна: в зоне переплава иногда наблюдаются трещины, поверхность детали требует последующей обработки (см. также следующий пункт).

4. В различных режимах закалки без переплава образцов из стали, взятой в состоянии поставки (без предварительной термической обработки), образуется мелко и среднеигольчатый мартенсит (2—5 баллов по ГОСТ 8233-56). На границах зоны закалки всегда образуется мелкоигольчатый мартенсит. В случае же закалки с переплавом в зоне переплава преимущественно образуется крупноигольчатый мартенсит.

5. В средних по времени облучения режимах ($0,1 \text{ с} < t_{об} < 1 \text{ с}$) на границе между закаленной и незакаленной областями может возникать переходная область с постепенным понижением твердости в ней. Толщина переходной зоны порядка 0,1 мм. Твердость же непосредственно в закаленной зоне остается примерно той же самой, что и при быстрых режимах: $730 \pm 50 \text{ кгс/мм}^2$ по Виккерсу при нагрузке 10 кгс (см. рис. 8, 9).

6. На медленных режимах ($1 \text{ с} < t_{об} < 3 \text{ с}$) ширина переходной зоны между закаленной и незакаленной областями возрастает. При $t_{об} \approx 2,5 \text{ с}$ твердость всей зоны закалки падает, а четкая граница между закаленной и незакаленной областями травлением шлифа уже не выявляется, т. е. самозакалка постепенно исчезает.

3. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗАКАЛЕННОЙ ЗОНЫ

Формулами данного раздела получены на основании упрощенного аналитического расчета [7]. Степень их согласия с экспериментом невысока (см. рис. 10—14), но часто достаточна для всевозможных оценок.

Приведен список использующихся для описания процесса величин: W_0 —поверхностная плотность введенной энергии в центре дорожки или полосы; I —ток пучка; E —энергия электронов или ускоряющее напряжение; d_n —гауссов диаметр пучка (см. (1.2) и рис. 2); v —скорость перемещения детали относительно пучка; k —температуропроводность материала; величина

$$\tau_{\perp} = \frac{\pi}{2} \frac{k d_n}{\delta_{\phi}^2 v} \quad (3.1)$$

есть относительное время ввода энергии пучка: определяется как отношение времени облучения

$$t_{об} = \frac{d_n}{v} \quad (3.2)$$

к характерному времени оттока тепла вглубь материала; ρ — плотность материала; c — удельная теплоемкость облучаемого материала; $\delta_{эф}$ — эффективная глубина свободного пробега электронов в материале: определяется по формуле

$$\delta_{эф} = 0,65\delta_e = \frac{0,35E - 0,1}{\rho}, \quad (3.3)$$

где δ_e — так называемый экстраполированный пробег — измеряется в МэВ, ρ в г/см³, $\delta_{эф}$ в см.

Некоторые вспомогательные величины для стали 45 представлены в табл. 2. Она составлена согласно выбранным средним значениям параметров стали 45 в зоне закалки: $\rho = 7,7$ г/см³; $c = 0,612$ Дж/г·град; $k = 0,06$ см²/с; $\Delta T_{пл} = 1400$ град.

Т а б л и ц а 2

E , МэВ	$\delta_{эф}$, мм	$\rho c \delta_{эф} \Delta T$, Дж/см ²	$t_0 = \frac{\pi}{2} \frac{\delta_e^2}{k}$, с
1	0,32	210	0,011
1,2	0,41	270	0,018
1,4	0,51	340	0,028

Поверхностная плотность энергии, обеспечивающая подъем температуры в точке максимума энерговыделения вблизи поверхности материала на ΔT ,

$$W_0 = W_{ад} \sqrt{1 + \tau_{\perp}} = \rho c \delta_{эф} \Delta T \sqrt{1 + \tau_{\perp}}, \quad (3.4)$$

где $W_{ад}$ — поверхностная плотность энергии в отсутствие теплопроводности материала (адиабатические условия). Значения $W_{ад}$ приведены в табл. 2.

Зависимость (3.4) проверялась для режимов начала подплавления $\Delta T = 1400^\circ\text{C}$, и в целом наблюдалось удовлетворительное согласие с экспериментом, в особенности при $\tau_{\perp} > 10$ (см. рис. 10).

Относительная ширина закаленной дорожки равна

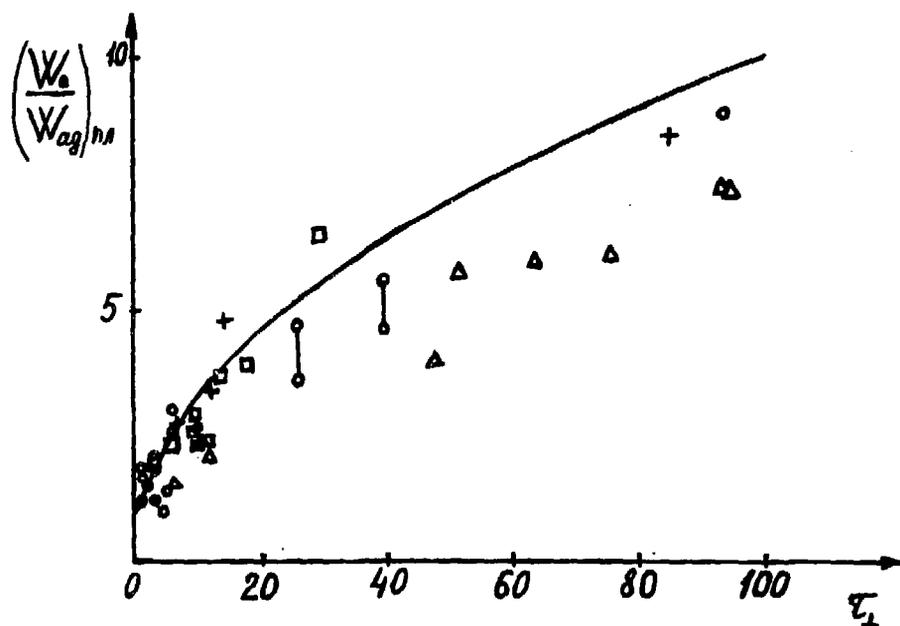


Рис. 10. Коэффициент отвода тепла от поверхностного слоя вблизи режимов под-
 плавления. Кривая построена по формуле: $W_0/W_{\text{ад}} = 1 + \tau_1$.
 + — $E=1$ МэВ; o — $E=1,4$ МэВ; Δ — квазиколецевой способ закалки, $E=1$ МэВ; □ — ква-
 зиколецевой способ закалки, $E=1,2$ МэВ.

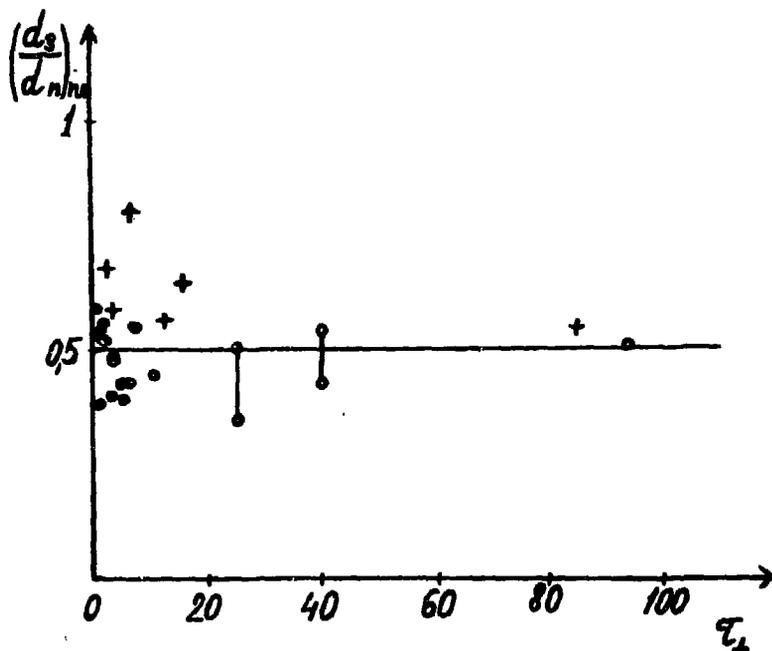


Рис. 11. Относительная ширина закаленной дорожки вблизи режимов начала под-
 плавления. Диаметр пучка d_n изменялся в пределах 2—35 мм. Прямая — предпола-
 гаемое значение величины $(d_3/d_n)_{\text{пл}}$.

$$\frac{d_3}{d_n} = \sqrt{\ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_3}}, \quad (3.5)$$

где ΔT_3 — подъем температуры до критической температуры закалки (см. п. 2.3); ΔT_u — наибольший подъем температуры, достигаемый в центре дорожки. Из (3.4)

$$\Delta T_u = \frac{W_0}{\rho c \delta_{эф} \sqrt{1 + \tau_{\perp}}}.$$

Для режимов, близких к плавлению, $\Delta T_u = \Delta T_{пл}$, d_3/d_n определяется из эксперимента, что позволяет из (3.5) найти ΔT_3 . Экспериментальные значения d_3/d_n во всех режимах, близких к плавлению, группируются вокруг величины

$$\left(\frac{d_3}{d_n}\right)_{пл} = 0,5 \quad (3.6)$$

(рис. 11). Из (3.6) и (3.5) находим $\Delta T_3 \approx 1100^\circ$.

Относительная глубина закаленной зоны равна

$$\frac{\delta_3}{\delta_{эф}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{(1 + \tau_{\perp}) \ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_3}}. \quad (3.7)$$

Для режима начала подплавления это дает (рис. 12)

$$(\delta_3)_{пл} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{W_0}{\rho c \Delta T_{пл}}. \quad (3.8)$$

Производительность процесса закалки удобно оценивать по двум показателям: площади поверхности η_1 , и объему η_2 закаленной зоны, приходящимся на единицу затраченной энергии. Для дорожечного способа закалки в режиме вблизи подплавления расчет дает

$$\eta_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi} W_0}, \quad (3.9)$$

что неплохо согласуется с экспериментом (рис. 13),

$$\eta_2 = 0,064 \frac{\text{см}^3}{\text{кДж}}, \quad (3.10)$$

что с экспериментом не согласуется. Экспериментальные значения

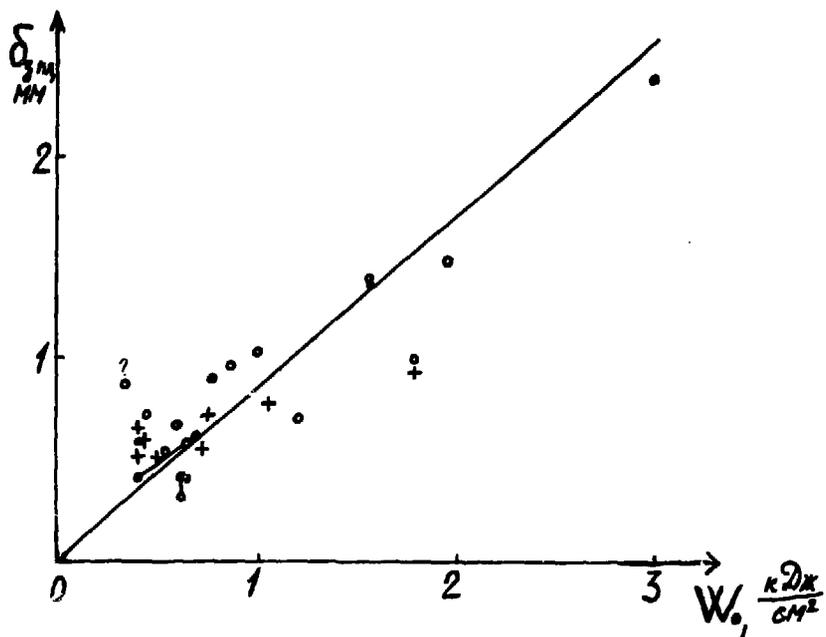


Рис. 12. Глубина закаленной зоны вблизи режима подплавления. Прямая соответствует формуле $(\delta_{\text{пл}})_{\text{пл}} = \frac{W_0}{\sqrt{\lambda \rho c \Delta T_{\text{пл}}}}$: + — $E=1$ МэВ; o — $E=1,4$ МэВ.

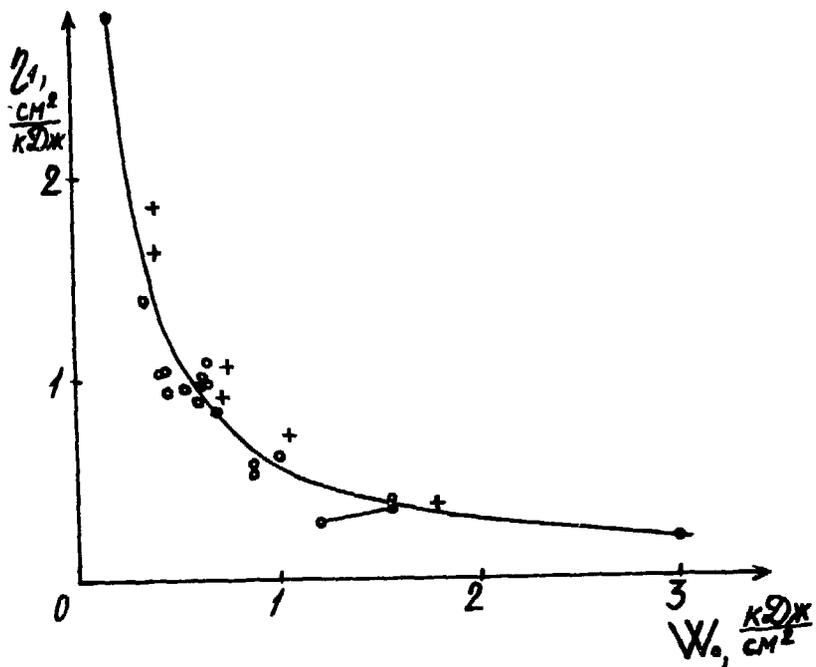


Рис. 13. Поверхностная производительность дорожечной закалки в режиме начала подплавления. Кривая построена по формуле $\eta_{\text{пл}} = \frac{1}{\sqrt{\pi} W_0}$: + — $E=1$ МэВ; o — $E=1,4$ МэВ.

располагаются вблизи убывающей кривой (рис. 14).

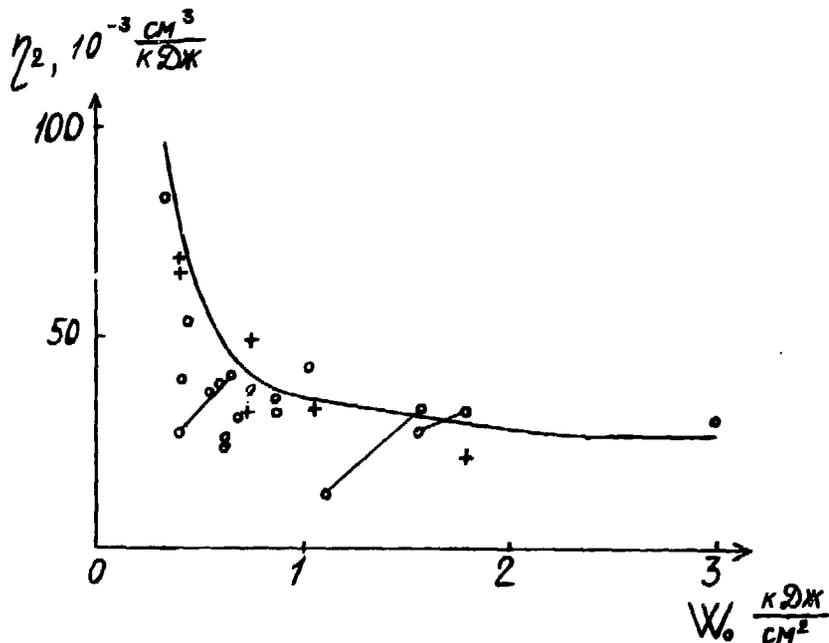


Рис. 14. Объемная производительность дорожечной закалки в режиме начала подплавления: + — $E=1$ МэВ; o — $E=1МэВ$.

Энергетическая эффективность полосовой закалки η_2 примерно в два раза выше, чем дорожечной. Энергетическую эффективность η_2 полосовой или квазиколецевой (см пп. 4.2 и 4.3) закалки можно сопоставить с тем, что обеспечивает по этому параметру закалка ТВЧ.

В процессе закалки ТВЧ

$$\eta_2 = 0,03 \frac{\text{см}^3}{\text{кДж}}.$$

Для квазиколецевой закалки по экспериментальным данным

$$\eta_2 = 0,1 \frac{\text{см}^3}{\text{кДж}}.$$

Если ввести КПД закалки как отношение энергии, которую надо было бы затратить на прогрев только закаленной зоны до критической температуры закалки T_3 , к полной затраченной энергии пучка, то для режимов начала подплавления расчет дает для полосового (квазиколецевого) способа закалки значение 50%.

4. ЗАМЕЧАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЗАКАЛКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

4.1. Дорожечная закалка

Начальная скорость охлаждения (см. разд. 2.1) во всех видах закалки обеспечивается, в основном, отводом тепла вглубь материала перпендикулярно к поверхности образца. Некоторую роль в увеличении скорости охлаждения играет отвод тепла в стороны от дорожки параллельно поверхности образца.

Чем уже дорожка, тем больше сказывается отвод в стороны. Оценка показывает, что прибавка в начальной скорости охлаждения начинает сказываться лишь для $d_{II} < 3$ мм.

Для единичной дорожки, проведенной на образце, достигается более низкая, чем в других способах закалки, конечная температура после выравнивания температур в образце.

В средних и медленных режимах облучения (см. табл. 1), когда существенна величина полного времени охлаждения, отток тепла в стороны также сказывается положительно, практически, при любой ширине дорожки.

Благодаря вышеупомянутым факторам, на сравнительно тонких образцах можно получить одиночную закаленную дорожку, в то время как закалка полосовым и квазикольцевым способом уже не получается.

Наименьшая толщина детали, при которой еще возможна закалка по способу дорожки, определялась проведением дорожки по клину с уменьшающейся толщиной под закаливаемой поверхностью.

При диаметре пучка 3 см и времени облучения $t_{об} = 0,1$ с закалка начинает исчезать при толщинах, меньших 2,5 мм. При меньших диаметрах пучка закалка возможна и на меньших толщинах материала.

При необходимости сплошного покрытия плоской поверхности дорожечным способом приходится накладывать дорожку на дорожку с нахлестом. На плоских образцах, как и следовало ожидать, в месте границы новой и старой дорожек образуются зоны отпуска.

4.2. Полосовая закалка

В отличие от наложения отдельных дорожек по способу дорожечной закалки, в способе полосовой закалки частота следования

отдельных проходов развертки подбирается такой, чтобы за время одного прохода тепло не успевало оттекать от поверхности образца. Тогда в каждой точке поверхности температура повышается в несколько ступеней, число которых определяется степенью нахлеста отдельных проходов в полосе. Общее время нагрева в каждой точке поверхности

$$t_{об} = \frac{d_n}{v}, \quad (4.1)$$

где v — скорость поступательного перемещения образца под сканирующим пучком.

Для того, чтобы после выравнивания температур в образце не произошел самоотпуск, т. е. чтобы в образце выполнялось условие $T < T_m$ (см. разд. 2.2), необходима толщина детали

$$H > \frac{W_0}{\rho c \Delta T_m}, \quad (4.2)$$

где W_0 — поверхностная плотность энергии на облученной полосе; ΔT_m — подъем температуры от начальной температуры детали до начала мартенситного превращения.

Сканирование пучка в способе полосовой закалки достигается применением электромагнитной развертки со следующими характеристиками:

Форма развертки пилообразная с одним скосом.

Расстояние от условного центра поворота пучка до выпускного отверстия, мм 20.

Тангенс наибольшего угла наклона пучка к вертикали 0,2.

Размер, занимаемый разверткой в направлении оси пучка (толщина разворачивающего устройства), мм 45.

Частота колебаний, Гц 25 — 40.

Режим закалки с наибольшей полученной шириной полосы характеризуется следующими параметрами: энергия электронов $E = 1,4$ МэВ, ширина закаленной полосы $l_3 = 55$ мм, скорость перемещения детали $v = 4,7$ см/с, среднее время воздействия пучка на каждую точку поверхности полосы $t_{об} = 0,6$ с, мощность пучка 32 кВт, средняя глубина закалки по полосе $\delta_3 = 0,6$ мм. Твердость закаленного слоя $HV(10 \text{ кгс}) = 620 \text{ кг/мм}^2$. Толщина образца $H = 1,5$ см. Несколько пониженная твердость в этом режиме закалки по сравнению с обычной (см. разд. 2.3, п. 5), по-видимому,

может быть объяснена небольшим превышением конечной температуры образца над температурой T_m , т. е. нарушением условия (4.2).

4.3. Закалка с вращением под пучком

Такая закалка возможна в трех режимах: так называемом квазиколецевом, дорожечном по спирали, полосовом по спирали.

Квазиколецевой режим предполагает настолько быстрое вращение детали, что прогретая пучком за время одного оборота дорожка не успевает остыть и частично нагревается дальше при следующем обороте. Каждый оборот эквивалентен проходу развертки при закалке полосовым способом. Время воздействия пучка определяется той же формулой ($t_{об} = d_n/v$).

Минимально допустимые диаметры вала определяются формулой (4.2), в которой в случае сплошного вала надо положить

$$H = \frac{D}{4}. \quad (4.3)$$

При стремлении уменьшить диаметр вала, для выполнения условия (4.2), приходится уменьшать толщину прогреваемого слоя, что можно сделать как за счет уменьшения времени ввода тепла (увеличение скорости обработки и, соответственно, мощности пучка с целью достижения адиабатического режима $W_0 = W_{ад}$), так и за счет уменьшения энергии электронов.

Каждому значению энергии электронов E соответствует предельный наименьший диаметр вала, который можно закалить без опасения отпуса.

Наибольшие диаметры вала в режиме квазиколецевой закалки ограничиваются сложностью быстрого вращения и предельной мощностью пучка.

Приведем предельно достигнутые квазиколецевые режимы для сплошного вала и двух труб. (см. табл. 3)

В результате значительного числа измерений твердости валов, закаленных в квазиколецевом режиме, выяснилось, что часто при измерении по Виккерсу HV (10 кгс) твердость оказывается несколько пониженной по сравнению со средней твердостью плоских образцов, закаленных дорожечным способом (сравн. табл. 3 и разд. 2.3 пп. 2 и 5). Между тем, при измерении микротвердости на тех же валах она оказывается обычной: на мартенситных зернах

порядка 1000 кгс/мм³, на ферритных порядка 250 кгс/мм². С чем связано небольшое понижение твердости *HV* (10 кгс) на валах, пока не ясно.

Таблица 3

Предельно достигнутые режимы закалки цилиндрических деталей

Внешний диаметр вала, <i>D</i>	Эффективная толщина, <i>H</i>	Энергия электронов, <i>E</i>	Расстояние от выпуска до детали, <i>h</i>	Время воздействия излучения, <i>t_{об}</i>	Скорость осевого перемещения, <i>v</i>	Частота вращения детали, <i>n</i>	Мощность пучка, <i>P</i>	Твердость слоя закалки <i>HV</i> (10 кг)
мм	мм	МэВ	см	с	см/с	об/мин	кВт	кгс/мм ²
22	5,5	1,2	5,5	0,16	4,2	1400	20	720
Труба Ø35 (вн. Ø22)	6	1	2,3	0,11	2,5	2400	13,5	630
Труба Ø100 (вн. Ø80)	10	1,2	3,5	0,31	1,3	1400	45	680

В дорожечном или полосовом по спирали режиме закалки вращающихся деталей скорость вращения *n* устанавливается такой, чтобы тепло от облученной дорожки или полосы успевало оттекать за время одного оборота, т. е. чтобы выполнялось условие:

$$\frac{1}{n} \gg \frac{\delta_{\text{эф}}^2}{\pi k}$$

Дорожечный или полосовой по спирали способы закалки оказываются единственно возможными в случае валов большого диаметра.

4.4. Закалка наклонных поверхностей

Проводились отдельные эксперименты по закалке поверхностей, наклоненных до 45° к плоскости, перпендикулярной пучку. Следует отметить, что в случае пересечения двух наклонных поверхностей закалка их возможна на большую глубину, если они образуют впадину (рис. 15,а), чем если они образуют выступ (рис. 15,б), поскольку в случае выступа приходится уменьшать поверхностную плотность введенной энергии пучка, чтобы избежать его расплавления.

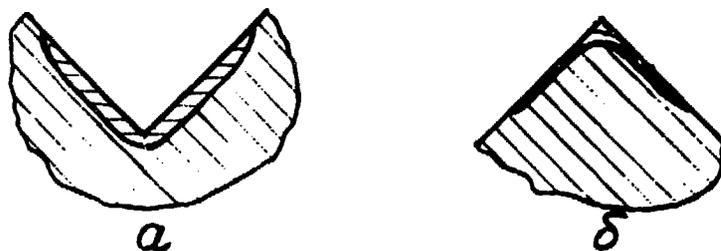


Рис. 15.

4.5. Поводки

Как указывалось во введении, при самозакалке электронным пучком поводки минимальны. Более того, при взаимокompенсирующем (симметричном) расположении закаленных зон ввиду стабильности цикла закалки поводок удастся практически избежать. Например, при закалке шлицевых валиков для коробки скоростей фрезерного станка ($\varnothing 21$ мм, длина 240 мм, материал: сталь 45 и 40X) на каждом из них проводилось вдоль осей по одной дорожке с $d_3 = 5$ мм. Появлялась стрела прогиба примерно $5 \cdot 10^{-2}$ мм по середине валика. При проведении на каждом валике второй дорожки, симметричной первой, стрела прогиба практически исчезла.

Упомянутые валики явились первой деталью, закаливавшейся для практического применения.

4.6. Технологические возможности ускорителей ИЯФ

С точки зрения применения для электронно-лучевой закалки деталей в промышленных условиях ускорители серии ЭЛВ (непрерывный пучок) обладают некоторыми недостатками.

В настоящее время они пригодны, лишь когда пучок может быть включенным достаточно долго — не менее нескольких минут. Это связано с тем, что время выхода на режим ускорителя серии ЭЛВ порядка 1,5 мин после каждого отключения, причем примерно 20 с при нарастающем токе пучка. Вывод пучка сначала приходится производить на мишень, далее под пучок подводится деталь. При этом часть детали, которая не должна подвергаться облучению, но лежит по ходу продвижения пучка, накрывается защитным экраном. Быстрое отключение пучка по окончании облучения в настоящее время обеспечивается.

Для иллюстрации сложностей, с которыми приходилось сталкиваться при закалке вращающихся деталей, опишем один из трех применявшихся приемов ввода пучка на вращающуюся деталь.

Деталь типа вала закрепляется с двух сторон, с одной из которых специальная оправка, зажимающая деталь, с другой — подпирающий центр, имеющий возможность вращаться. В оправке пер-

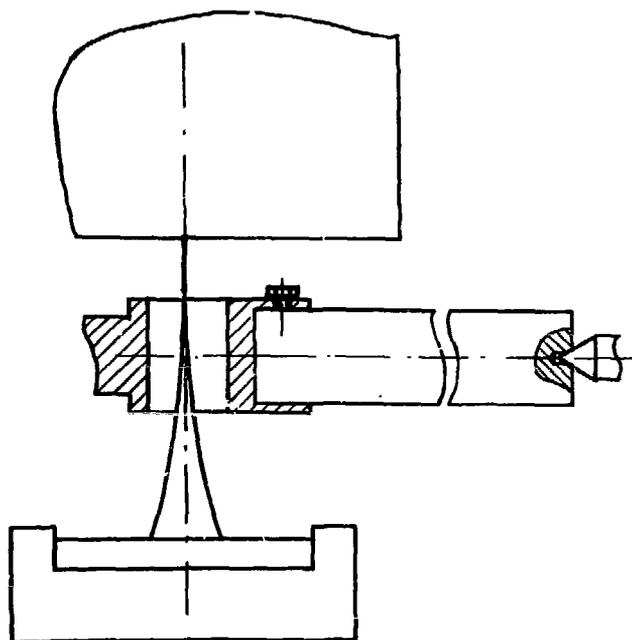


Рис. 16.

пендикулярно ее оси выполняется отверстие диаметром примерно 40 мм (см. рис. 16).

До выхода пучка на режим деталь неподвижна, а пучок проходит сквозь отверстие в оправке и попадает на мишень. Затем деталь приводится во вращение с одновременным поступательным перемещением вдоль оси. Пучок сначала скользит по оправке, затем по детали.

С целью существенного сокращения времени выхода на режим в настоящее время проводится модернизация ускорителей ЭЛВ. Проблема состоит в необходимости обеспечить минимальное время переходных процессов при стабильной энергии электронов (для стабильности геометрии пучка в выпускном устройстве).

Другая проблема — надежность работы ускорителя в режиме быстро чередующихся переходных процессов при включениях и выключениях пучка.

Несмотря на указанные сложности, есть основания предполагать, что «быстрый» ЭЛВ будет иметь время включения порядка десятых долей секунды.

Наряду с ускорителями серии ЭЛВ для целей закалки перспективно применение импульсных ускорителей. Последние удобны для закалки ограниченных участков поверхности деталей, поскольку для них дозирование требуемых порций энергии в зависимости от площади упрочняемого участка обеспечивается соответствующим количеством импульсов в пакете, что не вызывает трудностей.

Только импульсным ускорителем можно закаливать отдельные пятна на поверхности. Закалка же дорожек и т. п. может производиться совершенно аналогично непрерывному пучку с применением тех же расчетных зависимостей, в которых будут фигурировать средняя мощность и средний ток пучка.

В то же время импульсность может сказаться на равномерности закалки, что требует правильного выбора режима и накладывает свои ограничения.

Можно сказать, что до некоторой длительности промежутка времени одного включения (сегодня это минуты) нужен импульсный ускоритель, а при больших временах — ускоритель типа ЭЛВ. Это основной критерий для решения вопроса, какой ускоритель лучше подходит для определенной технологии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрированный пучок электронов в атмосфере с энергией 1—2 МэВ, полученный на разработанных в ИЯФ ускорителях, может найти применение в машиностроении и других отраслях для поверхностной закалки стали.

В ходе настоящей работы опробованы различные технологические приемы и режимы закалки и соответственно им отмечены отдельные металлографические особенности закаленной зоны.

Предложена оценочная зависимость между режимом закалки и размерами закаленной зоны.

Приведены требования к специализированным ускорителям для поверхностной закалки стали.

Важным шагом по исследованию возможностей технологии поверхностной закалки стали концентрированным электронным пучком в атмосфере и ее практическому применению в промыш-

ленности может стать организация физико-технологического центра ИЯФ СО АН СССР при Новолипецком металлургическом комбинате и Липецком политехническом Институте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Углов В.С., Шубин А.П. Применение высокоинтенсивных импульсных пучков электронов в технологии металлов. — Поверхность, 1985, № 12, с.87.
2. Лончин Г.М., Мачурин Е.С. Влияние облучения электронами на структуру и механические свойства стали. — IV Всесоюзное совещание по применению ускорителей в народном хозяйстве. — Л., 1982, т. III.
3. Горбунов В.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Черток И.Л. Выпуск в атмосферу концентрированного пучка электронов до 60 кВт ускорителя ЭЛВ-4. — В кн.: Доклады III Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. — Л., 1979, с.122 — 125.
4. Вассерман С.Б., Радченко В.М. Импульсный ускоритель электронов с большой частотой повторения. — В сб.: V Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тез. докл., Томск, 1984, т.2, с.43 — 44.
5. Вассерман С.Б. О применении импульсных электронных пучков. — Отчет ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1984.
6. Вайсман А.Ф., Вассерман С.Б., Кедо В.Б., Петров С.Е., Салимов Р.А., Фадеев С.Н. Эксперименты по поверхностной закалке стали концентрированным пучком в атмосфере. — В кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве. — Л., 1985, с.85 — 86.
7. Голковский М.Г., Вайсман А.Ф., Вассерман С.Б., Салимов Р.А. Аналитическая оценка температурного режима и размеров закаленной зоны при закалке стали концентрированным электронным пучком. — Отчет института Гипроцемент, Л., 1986.
8. Петров С.Е., Фадеев С.Н., Вайсман А.Ф. Исследование характеристик концентрированного пучка электронов в атмосфере. — Отчет института Гипроцемент, Л., 1987.
9. Баранов В.Ф. Дозиметрия электронного излучения. — М.: Атомиздат, 1974.
10. Гуляев А.П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1977, с.257, рис.200.
11. Попов А.А., Попова Л.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Металлургия, 1965, 106с.
12. Попов А.А. Фазовые превращения в металлических сплавах. — М.: Металлургия, 1963, с.275 — 280.
13. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник/Под ред. М.Л. Берштейна и А.Г. Рахштадта. Т. II. М.: Металлургия, 1983, с.86 — 89.

*А.Ф. Вайсман, С.Б. Вассерман,
М.Г. Голковский, В.Д. Кедо, Р.А. Салимов*

**О поверхностной закалке стали
концентрированным электронным
пучком в атмосфере**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 15 марта 1988 г.
Подписано в печать 20.05. 1988 г. МН 08341
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,9 печ.л., 2,4 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 73

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*