

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЗАКАЛЕННОГО И ОТПУЩЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ ПОСЛЕ СКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

© 2003 И. М. Мальцев

Нижегородский государственный технический университет

Исследована структура и свойства стали 25 после нагрева импульсным током высокой плотности под закалку, влияние скорости охлаждения и высокого отпуска на стабильность свойств.

Введение

В настоящее время технология сталей включает методы скоростной электротермической обработки (СЭТО). Это вызвано следующими факторами: устраняется отпускная хрупкость при электроотпуске [1], повышаются конструктивная прочность [2] и вязкость разрушения сталей [3] в сравнении со сталями, прошедшими печную термическую обработку [4]. Отличительной особенностью электрофизических процессов является то, что сам материал, его структура и свойства являются главным компонентом, реализующим условия и результат технологической операции.

Известно, что при быстром нагреве стали протекают процессы: превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ и диффузия углерода, получается мелкозернистый аустенит. Регулированием энергетических параметров процесса СЭТО (скоростью нагрева, плотностью тока [5]) можно достигать различного структурного состояния стали и управлять ее свойствами. Процесс СЭТО является быстропротекающим. При высоких скоростях нагрева фазовое превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ сдвигается в область высоких температур. Интервал температур, в котором протекает превращение, тем шире, чем больше скорость нагрева [6]. При повышении скорости нагрева примерно от 300 до 1300 К·с⁻¹ для стали с ферритно-перлитной структурой при практически не изменяющейся температуре A_{c1} температура A_{c3} значительно повышается [7].

В данной работе рассматривается влияние энергетических параметров СЭТО на структуру и свойства низкоуглеродистой стали 25, которую используют для изготовления шпилек, болтов, винтов, валов, осей - про-

стых по форме деталей, пригодных для реализации электрофизической технологии. Оценивалось влияние тока высокой плотности (электронного ветра) на структуру и свойства стали после СЭТО, о котором указывалось в [8]. Кроме того, изучалось влияние среды охлаждения и последующего изотермического нагрева на стабильность и свойства СЭТО стали, данных о котором крайне мало.

Методика исследования

Была спроектирована и изготовлена установка для проведения СЭТО, которая состоит из генератора электрических импульсов мощностью 40 кВт [9]; водоохлаждаемых токопроводов; устройства, фиксирующего детали при СЭТО, выполненного на базе установки [10]. Установка позволяет достигать электрического тока до 11 кА с длительностью импульсов от 0,02 до 0,2 с, пауз от 0,02 до 1 с и нагревать стальные образцы диаметром 5 мм и длиной 100 мм до температуры плавления со скоростью до 250 К·с⁻¹. Плотность тока в образце достигает 10⁸ - 10⁹ А/м². При такой плотности тока возможен эффект "электронного ветра" [5, 11, 12]. Отметим, что во многих работах при реализации СЭТО параметр плотности тока не указан. Протекание тока высокой плотности в металле может вызывать ускорение диффузионных процессов [13], нагрев внутренних участков металла, образование избыточных вакансий, диффузионный перенос вещества под действием образующихся градиентов химического потенциала и температуры, а также появление термических напряжений [5].

Энергия, выделяемая на нагреваемых образцах, регулируется изменением скважности электрических импульсов Q . Скважность

Q - обратная величина от произведения частоты импульсного тока F и длительности импульса тока τ [5], которая характеризует интенсивность тока. Изменяя скважность и время процесса СЭТО, можно регулировать скорость нагрева и температуру обработки.

Методика работы основывается на сравнении твердости и временного сопротивления разрыву образцов из стали 25 после печного нагрева и после СЭТО, закаленных в воде. Проволочную сталь 25 предварительно подвергали холодному волочению со степенью деформации не менее 25 %. СЭТО образцов проводилась по следующим режимам: изменялась скважность Q; первый режим: длительность импульса $\tau_1 = 0,02$ с, паузы $\tau_2 = 0,02$ с, Q = 0,5; второй режим: $\tau_1 = 0,02$ с, паузы $\tau_2 = 0,04$ с, Q = 0,33; третий режим: $\tau_1 = 0,02$ с, паузы $\tau_2 = 0,03$ с, Q = 0,25. Поперечное сечение образца, общее электрическое сопротивление цепи “нагрузка - установка СЭТО” были выбраны так, чтобы при прохождении импульса тока его плотность соответствовала 10^8 - 10^9 А/м² [5]. При СЭТО изменялось время воздействия тока высокой плотности на обрабатываемые образцы. Время нагрева t составляло 3, 4, 5, 6, 7, 8 с, соответственно. При нагреве свыше 6 с по первому режиму образцы получали сильное коробление и частично оплавливались при СЭТО. Аналогичные явления наблюдались и для других режимов Q, но при времени воздействия тока высокой плотности свыше 8 с.

Известно [9], что при электроконтактном нагреве или СЭТО изделие сильнее нагревается в сердцевине, а не от поверхности, как при печном нагреве. Процесс протекает за очень короткое время (за секунды), и в связи с этим возникают сложности определения истинной температуры обработки. В экспериментах с СЭТО температуру нагрева определить не удалось. После нагрева (изотер-

мическая выдержка не делалась) образцы закаливали в воде, масле и на воздухе. На образцах после СЭТО измерялись твердость НВ, временное сопротивление разрыву σ_b , удельное электросопротивление и проводились металлографические исследования. Аналогичные исследования проведены для образцов, прошедших печной нагрев с выдержкой 1 час и охлаждение в воде. В опытах при каждом нагреве использовалось не менее 9 образцов. Статистическая обработка проводилась на IBM PC. Рассчитывалась относительная ошибка измерения, по которой оценивалась стабильность физико-механических свойств стали 25.

Результаты исследований и их обсуждение

В таблице 1 приведено изменение твердости, а в таблице 2 – изменение временного сопротивления разрыву стали 25 после СЭТО по различным режимам.

Данные таблицы 1 показывают, что твердость образцов, прошедших обработку со скважностью Q = 0,5 и 0,33, увеличивалась с повышением энергии, выделяемой на нагрузке – образце (скорости подъема температуры), а при Q = 0,25 была самая низкая скорость нагрева и повышение твердости с увеличением τ выражено слабо. Отметим, что температура СЭТО, которую оценивали по косвенным признакам нагрева образцов (цвет излучения), одинакова для режимов при времени нагрева 6 (Q=0,5), 8 (Q=0,33) и 8 (Q=0,25) с. Для Q=0,5 при времени нагрева 4 с наблюдается падение твердости. Такое же падение твердости наблюдается при Q=0,33 при времени нагрева 5 с. Падение твердости связано с нагревом стали в межкритическом интервале. Твердость стали при времени нагрева 8 с (Q=0,33) оказывается выше, чем твердость стали при 6 с (Q=0,50).

Таблица 1

Изменение твердости НВ и относительной ошибки измерения E (%) стали 25 после СЭТО по трем режимам Q - охлаждение в воде

Скважность Q	Время нагрева τ , с					
	3	4	5	6	7	8
0,50	227 ± 5	202 ± 2	224 ± 6	300 ± 11	плавление образца	
0,33	205 ± 5	225 ± 2	220 ± 6	248 ± 10	272 ± 8	316 ± 11
0,25	216 ± 5	234 ± 2	233 ± 3	213 ± 4	207 ± 4	217 ± 4

Таблица 2

Изменение временного сопротивления разрыву σ_b и относительной ошибки измерения E (%) стали 25 после СЭТО по трем режимам Q - охлаждение в воде

Скважность Q	Время нагрева τ , с					
	3	4	5	6	7	8
0,50	627 ± 5	624 ± 5	1013 ± 26	1144 ± 30	плавление образца	
0,33	566 ± 7	585 ± 6	618 ± 5	830 ± 28	687 ± 11	1114 ± 3
0,25	497 ± 6	547 ± 11	574 ± 3	615 ± 9	620 ± 4	609 ± 7

Из данных таблицы 2 видно, что повышение энергии, выделяемой на образце, и увеличение времени нагрева приводит к повышению значения временного сопротивления. При этом для режима с $Q = 0,25$ эффект упрочнения выражен слабо в сравнении с $Q = 0,50$ и с $Q = 0,33$. Это связано с низкой для СЭТО скоростью нагрева. Временное сопротивление одинаково для образцов, прошедших обработку с $Q = 0,50$ и с $Q = 0,33$, время нагрева 6 и 8 с, соответственно.

Результаты исследований показывают, что возрастает ошибка эксперимента при определении твердости НВ (таблица 1) и временного сопротивления σ_b (таблица 2) для $Q = 0,5$. Ошибка эксперимента при определении σ_b возросла не только при СЭТО, но и при печном нагреве при увеличении температуры обработки (таблица 3). Это связано с известным влиянием начинающегося перегрева стали. Возможно, такое изменение свойств стали связано с неоднородностью нагрева границ зерен и их центра [14].

Плотность электрического тока в импульсе в каждом режиме Q была одинакова. Сравнение результатов СЭТО по трем режимам (таблицы 1 и 2) показывает, что не плотность тока (электронный ветер [8]), а энергия, выделяемая на образце (скорость нагрева), определяет структуру и свойства предва-

рительно деформированной стали. Эффект "электронного ветра" проявляется при одно-временной деформации и пропускании тока высокой плотности [5]. В конкретных условиях СЭТО его влияние, приводящее к пластичности металла, не проявляется. С увеличением интенсивности тока высокой плотности или Q твердость стали повышается при изменении τ от 3 до 8 с (табл. 2). Возможно, что процессы, изменяющие структуру стали "электронным ветром", подавляются высокими скоростями нагрева и фазовым превращением. Кроме того, влияет и степень перегрева и переохлаждения аустенита при закалке, возрастающая с увеличением Q и τ .

Данные таблицы 3 показывают свойства стали 25 после печной обработки. Сравнение данных таблиц 1 и 2 с таблицей 3 показывает, что при печном нагреве твердость и временное сопротивление ниже, что согласуется с работами [2, 3].

Металлографический анализ выполнен для всех случаев варьирования Q и τ . Сравнение структур стали, полученных после СЭТО и печного нагрева, показало, что СЭТО создает более дисперсную структуру.

Нагрев при СЭТО до околосolidусных температур не приводил по данным металлографии к значительному перегреву. Рост энергии, выделяемой на образце Q (скорос-

Таблица 3

Влияние температуры закалки в печи стали 25 на твердость (НВ), временное сопротивление разрыву (σ_b) и относительную ошибку измерения E (%)

Режим обработки	Твердость, НВ	Временное сопротивление σ_b , МПа
Закалка 680 °С	286 ± 5	534 ± 5
Закалка 860 °С	332 ± 4	764 ± 31
Закалка 950 °С	275 ± 2	952 ± 44

ти нагрева), увеличивает дисперсность структуры стали СЭТО, что согласуется с положениями работ [2 - 4, 6 - 8]. При постоянных Q с увеличением τ структура изменялась от феррита - перлита до мартенсита. Данные проведенных механических испытаний и проведенного металлографического анализа образцов после СЭТО показали, что каждый режим нагрева индивидуально для скважности Q и времени нагрева τ формирует в стали свою микроструктуру и свойства. Даже при незначительном воздействии СЭТО ($Q=0,5...0,25$; $\tau=3...4$ с) механические свойства повышались в сравнении с исходным состоянием ($\sigma_b = 450$ МПа, НВ = 210). Существенных различий микроструктуры при этом не наблюдалось. Данные показывают, что улучшение свойств связано не только с изменением микроструктуры, но и с факторами, которыми могут быть изменения субструктуры стали, вызванные высокими скоростями нагрева.

Экспериментальные результаты показывают, что σ_b во всех режимах повышается с увеличением времени обработки, при этом с увеличением скважности Q значение σ_b возрастает. Очевидно, что чем выше скорость нагрева, тем большую величину приобретает σ_b . Однако для $Q=0,33$ и $\tau=7$ с наблюдается падение σ_b . Временное сопротивление при $Q = 0,5$ и $0,33$ (время нагрева 6 и 8 с, соответственно) имеет примерно одинаковые значения, а для $Q=0,25$ с ростом времени нагрева от 3 до 8 с временное сопротивление увеличивается слабо. Отметим, что условия окончательного нагрева во всех случаях одинаковы, разными являются скорости нагрева. СЭТО приводит к повышению σ_b по сравнению с исходным состоянием и с печным нагревом. Для $Q = 0,5$ и $0,33$ наблюдается по-

вышение твердости НВ с увеличением времени СЭТО, а для $Q=0,25$ НВ изменяется мало. Для $Q = 0,5$ и $0,33$ существует падение твердости при $\tau = 5$ с, а при $Q = 0,25$ падение НВ проявляется при $\tau = 7$ с, что связано с нагревом стали в межкритическом интервале температур. Металлографический анализ показывает, что изменение НВ совпадает с изменением микроструктуры.

При изменении времени τ последовательно протекают разнородные процессы, которые оказывают особое влияние на формирование свойств деформированной стали. При печной обработке стали 25, включающей изотермическую выдержку, подобного изменения НВ не происходит. Скачки изменения твердости при СЭТО можно объяснить различным структурным состоянием стали, достигаемым при различных режимах СЭТО.

При обычном нагреве стали протекают следующие процессы: распад цементита, исчезновение феррита, затем островков цементита, образование и рост аустенитных зерен, фазовый наклеп и превращение, диффузия углерода [15]. При скоростном нагреве эти процессы могут затормаживаться, особенно сильно должно сказываться отсутствие изотермической выдержки. Все это приводит к формированию специфической структуры, свойственной стали после СЭТО.

Представляет интерес поведение стали, обработанной СЭТО, после изотермического нагрева. Образцы СЭТО подвергались отпуску (550...600 °С) в течение 2 часов (охлаждение на воздухе). В таблице 4 показано влияние изотермического нагрева образцов, прошедших СЭТО, на твердость НВ.

Данные таблицы показывают, что изотермическая выдержка после СЭТО выравнивает и снижает значения твердости для

Таблица 4

Твердость НВ стали 25 и относительная ошибка измерения E (%) после СЭТО по различным режимам и отпуска в печи при 550...600 °С за 2 часа (охлаждение на воздухе)

Скважность Q	Время нагрева τ , с					
	3	4	5	6	7	8
0,50	143 ± 2	123 ± 6	132 ± 2	143 ± 9	плавление образца	
0,33	136 ± 5	128 ± 9	106 ± 9	122 ± 2	126 ± 6	115 ± 1
0,25	134 ± 10	128 ± 9	115 ± 3	134 ± 3	108 ± 4	128 ± 6

всех режимов. Указанное выше падение твердости НВ сохраняется и после изотермической выдержки. Видно, что происходит падение твердости при $Q=0,5$, $\tau=4$ с; $Q=0,33$, $\tau=5$ с и $Q=0,25$, $\tau=7$ с. Для других режимов СЭТО падение твердости сохраняется при $Q=0,33$, $\tau=5$ с; $Q=0,25$, $\tau=6$ с. Данные таблицы показывают, что при меньшей степени воздействия СЭТО за время воздействия от 3 до 4 с твердость стали оказывается выше у образцов, которые были обработаны с меньшей энергией электрического тока Q (меньшей температурой нагрева), а при τ от 5 до 8 с - наоборот.

Такая закономерность проявляется только у образцов СЭТО, прошедших изотермический нагрев. Поведение свойств стали можно объяснить следующим: при малых порциях СЭТО (Q и τ) в деформированной стали свойства зависят от процессов, сохраняющих созданную деформацией дислокационную структуру металла, а при высоких значениях нагрева СЭТО (Q и τ) свойства формирует фазовое превращение $\alpha \rightarrow \gamma$, что подтверждает металлографическое исследование.

Исследование σ_v образцов СЭТО после изотермического нагрева показало, что значения σ_v при отпуске снижаются, и наблюда-

ются зависимости, аналогичные приведенным в таблице 4.

Свойства стали, прошедшей закалку в печи и отпуск 550...600 °С за 2 часа, приведены в таблице 5.

Данные таблицы показывают, что с увеличением температуры нагрева под закалку в печи после отпуска твердость стали НВ для всех режимов одинакова и находится в пределах погрешности эксперимента.

Высокие скорости нагрева СЭТО обеспечивают устойчивость структуры стали при последующем изотермическом нагреве. С повышением температуры критических точек, вызываемым высокой скоростью нагрева (в данной работе при СЭТО), при прочих равных условиях должна повышаться и отпускная устойчивость стали [6, 16]. Металлографический анализ, проведенный после изотермического нагрева, показал, что при СЭТО и печном нагреве под закалку формируются микроструктуры, свойственные отпущенной стали.

Для исследования изменения ошибки измерения стали 25 при определении свойств с предварительного отжига проводились СЭТО с $Q = 0,5$ с охлаждением в воде, масле и на воздухе (табл. 6).

Таблица 5

Твердость НВ, микротвердость Нv и относительная ошибка измерения E (%) стали 25 после закалки в печи и отпуска в печи 550...600 °С за 2 часа

Режим обработки	НВ	Нv
Закалка 680 °С, охлаждение в воде, отпуск 550...600 °С 2 часа, охлаждение на воздухе	100 ± 6	1791 ± 12
Закалка 860 °С, охлаждение в воде, отпуск 550...600 °С 2 часа, охлаждение на воздухе	99 ± 9	1506 ± 9
Закалка 950 °С, охлаждение в воде, отпуск 550...600 °С 2 часа, охлаждение на воздухе	98 ± 6	1250 ± 11

Таблица 6

Твердость стали 25 (HRB) и относительная ошибка измерения E (%) после операции СЭТО за время от 3 до 6 с по режиму $Q=0,5$ при охлаждении в разных средах

Среда охлаждения	Время обработки СЭТО, с			
	3	4	5	6
Вода	31 ± 4,92	48 ± 13,68	47 ± 11,83	56 ± 13,27
Масло	40 ± 2,50	47 ± 2,12	52 ± 2,11	63 ± 2,38
Воздух	34 ± 8,82	37 ± 5,41	44 ± 2,27	41 ± 4,87

Таблица 7

Удельное электросопротивление стали 25 ($\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) и относительная ошибка измерения E (%) после операции СЭТО за время от 3 до 6 с по режиму $Q=0,5$ при охлаждении в разных средах

Среда охлаждения	Время обработки СЭТО, с			
	3	4	5	6
Вода	$3,306 \pm 7,07$	$3,781 \pm 1,55$	$3,509 \pm 2,88$	$3,11 \pm 8,43$
Масло	$3,132 \pm 1,45$	$3,18 \pm 0,11$	$3,362 \pm 0,65$	$2,751 \pm 6,76$
Воздух	$3,188 \pm 0,56$	$3,717 \pm 1,73$	$3,490 \pm 1,81$	$3,664 \pm 0,12$

Данные таблицы 6 показывают, что относительная ошибка измерения уменьшается при увеличении времени обработки для случая охлаждения в масле и на воздухе. Однако при максимальном времени обработки относительная ошибка резко возрастает ($\tau = 6$ с). Относительная ошибка измерения возрастает и при увеличении скорости охлаждения (табл. 6, 7). При охлаждении образцов СЭТО на воздухе, когда нет мартенситного превращения, относительная ошибка измерения резко возрастает, когда время обработки (температура) образцов СЭТО достигает максимального значения. Все это указывает на то, что причинами разброса свойств стали СЭТО являются процессы на границах зерен при прохождении электрического тока, высокие скорости охлаждения и перегрев.

Характерный разброс свойств стали 25 при СЭТО наблюдается и при измерении удельного электросопротивления (табл. 7) и временного сопротивления при растяжении (табл. 8).

Обработка СЭТО (табл. 8) при времени обработки 5 и 6 с повышает временное сопротивление растяжением на 16...20 % по сравнению с временем обработки 3 и 4 с, что связано с известным явлением измельчения зерна при СЭТО фазовым превращением $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. При закалке в масле и в воде значения твердости стали 25 после СЭТО находятся в одном интервале (табл. 7), но при

меньшей скорости охлаждения (в масле) относительная ошибка измерения твердости минимальна, и, следовательно, свойства более стабильны.

Результаты исследования показывают, что на разброс физико-механических свойств стали влияет не "электронный ветер", а технологические параметры СЭТО. Регулируя время нагрева и скорость последующего охлаждения при СЭТО, можно управлять стабильностью физико-механических свойств доэвтектоидной стали 25, получать минимальные разбросы твердости, удельного электросопротивления и прочности при растяжении.

Выводы

Сравнение свойств стали после СЭТО и печного нагрева показывает, что разные физические процессы, формирующие свойства стали в условиях нагрева, создают разную структуру, свойства доэвтектоидной деформированной стали и реализуются разными механизмами. Во время СЭТО с увеличением скорости нагрева и времени воздействия обработки последовательно протекают процессы, которые сначала контролируются явлениями, вызванными предварительной деформацией, а затем фазовым превращением $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. Применение тока высокой плотности при СЭТО не оказывает заметного влияния на свойства стали. При нагреве стали СЭТО в межкритическом интервале

Таблица 8

Временное сопротивление стали 25 (σ_b , МПа) и относительная ошибка измерения E (%) операции СЭТО за время от 3 до 6 с по режиму $Q=0,5$ при охлаждении на воздухе

	Время обработки СЭТО, с			
	3	4	5	6
	$371 \pm 0,26$	$371 \pm 0,25$	$427 \pm 0,22$	$443 \pm 3,69$

температур проявляется падение твердости. Высокие скорости нагрева СЭТО обеспечивают устойчивость стали против отпуска. Разные параметры быстропротекающей СЭТО формируют индивидуальные структуру и свойства доэвтектоидной деформированной стали. Уменьшение скорости охлаждения при СЭТО и проведение отпуска снижает разброс физико-механических свойств стали.

Список литературы

1. Мешков Ю. Я., Стаценко И. С., Безбах В. Д. О причинах подавления отпускной хрупкости в сталях при скоростном электроотпуске // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1994. № 2. С. 15-17.

2. Гриднев В. Н. Ошкадеров С. П. Применение скоростной термической обработки для повышения конструктивной прочности сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1987. № 11. С. 19 - 23.

3. Рыш П., Гаровец Ф., Шкарек И. и др. Влияние скоростной аустенизации на вязкость разрушения конструкционных сталей // *Металлофизика*. 1986. Т. 8. № 6. С. 55 - 61.

4. Длоуги И., Михаличка П., Шкарек И., Герасим Ю. А., Ошкадеров С. П. Механо-электротермическая обработка низколегированных сталей с 0,3 - 0,6 % С // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 3. С. 37 - 40.

5. Спицин В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. - 159 с.

6. Лахтин Ю. М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. М.: Металлургия. 1979. - 320 с.

7. Никишков Н. А., Соколов А. М., Ульянов В. Г. Влияние скорости нагрева на критические температуры альфа - гамма превращения в стали 40X // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 8. С. 2 - 4.

8. Берштейн Л. И., Силер А. С. Способ электроконтактной обработки изделий из пружинной стали в водной среде // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 8. С. 11 - 12.

9. Мальцев И. М., Петриков В. Г. Установка для электроимпульсного спекания проводящих порошков при прокатке // *Порошковая металлургия*. 1993. № 3. С. 113 - 116.

10. Мальцев И. М. Установка электроимпульсного спекания порошка под давлением // *Порошковая металлургия*. 2000. № 1/2. С. 125 - 128.

11. Головин Ю. М. Механические свойства и поведение реальных металлов в сильных электрических и магнитных полях // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1993. № 8. С. 67 - 71.

12. Герасимов Л. С., Искренников В. И. Прораствание неоднородности и эволюция линий тока в металлическом проводнике при высокой плотности тока // *Журнал технической физики*. 1991. Т. 61. Вып. 12. С. 1143 - 1145.

13. Мальцев И. М., Петриков В. Г. Влияние изотермического отжига на свойства порошкового проката сплавов системы Fe - Cr - Ni // *Порошковая металлургия*. 1994. № 11-12. С. 79 - 84.

14. Забильский В. В., Никонова Р. М. Хрупкость стали при околосolidусных температурах (состояние проблемы) // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1999. № 6. С. 19 - 25.

15. Арзамасов Б. Н. и др. *Научные основы материаловедения. Учебник для вузов*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. - 366 с.

16. Чейлях А. П. Повышение механических свойств конструкционных сталей скоростной высокотемпературной закалкой // *Российская Академия наук. Металлы*. 1995. № 2. С. 75 - 81.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ANNEALED AND TEMPERED STEEL AFTER RAPID ELECTROTHERMAL PROCESSING

© 2003 I. M. Maltsev

Nizhny Novgorod State Technical University

The structure and properties of steel 25 after heating it with high-density pulse current for hardening, the influence of cooling speed and high tempering on the stability of properties have been investigated.