

УДК 669. 021: 621.762

Б.В. Устинов¹, Е.Н. Гришин², А.А. Аушев², И.М. Мальцев¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ ФИЗИКОТЕХНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 8Х6НФТ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
РФЯЦ ВНИИЭФ²

Рассматривается влияние времени воздействия электрофизического фактора скоростного электроимпульсного нагрева током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² на структуру и свойства стали 80Х6НФТ. Проведены кристаллографические исследования на сканирующем электронном микроскопе методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD). Представлены исследования микроструктуры. Применение технологии скоростной электротермической обработки СЭТО для проведения отпуска исследуемых образцов не приводит к значительному снижению значений твердости, не смотря на завышение температуры отпуска, сохраняя тем самым высокую износостойкость материала. Микроструктуры образцов после печной закалки с 950 °С и закалки методом СЭТО (время нагрева 3 с) с охлаждением в масле и последующим отпуске в 200 °С имеют схожее зернограничное и субграничное строение, однако значение твердости образцов при закалке методом СЭТО выше. Несмотря на значительное завышение температуры закалки при СЭТО и высокие скорости нагрева, микроструктура образцов не имеет следов перегрева и пережога и других нежелательных дефектов.

Ключевые слова: скоростная электротермическая обработка, сталь, ток высокой плотности, структура и свойства, малоугловые границы, специальные границы, электрофизические методы обработки металлических материалов.

Введение

Широкое распространение электрофизических методов обработки металлических материалов связано с их положительным воздействием на структуру материалов. При использовании данного метода для проведения отпуска сталей устраняется отпускная хрупкость [1], повышаются конструктивная прочность [2] и вязкость разрушения сталей [3] в сравнении со сталями, прошедшими печную термическую обработку [4]. В настоящей работе изучается возможность проведения электрофизического процесса закалки и отпуска током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² инструментальной стали 8Х6НФТ. Применение токов высокой плотности при нагреве под термическую обработку позволяет ускорить диффузионные процессы, повысить скорость нагрева и изменить критические точки сталей [5-6]. Особенностью скоростной электротермической обработки (СЭТО), кроме термических процессов, является возникновение электрофизических эффектов, к которым относится эффект “электрокристаллизации” [7-9]. Действие высоких скоростей нагрева и эффекта электрокристаллизации приводит к измельчению зерен, что улучшает комплекс физико-механических свойств. В обработке инструментальной стали важно получить высокое значение твердости в сочетании с высоким значением сопротивления разрушению. Литературные данные, в том числе зарубежные, и [10] показывают, что в электротермической обработке сталей и в научных экспериментах, за исключением [11 -13], не применяются токи высокой плотности, а это позволяет проводить электротермическую обработку за короткое технологическое время, используя значительный перенагрев.

Цель настоящей работы – применение технологии СЭТО, для обработки инструментальной стали марки 8Х6НФТ, основанной на нагреве изделий импульсными токами высокой плотности.

Методика эксперимента

Для проведения исследования СЭТО использовалась инструментальная сталь 8Х6НФТ. Характерная термическая обработка данной стали включает в себя закалку и низкий отпуск. Процесс СЭТО проводили по методике и на установке конструкции НГТУ [5, 14, 15]. Для проведения экспериментов использовали электроконтактный нагрев током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² в импульсном режиме: длительность импульса 0,02 с, длительность паузы 0,02 с. Частота импульсов 25 Гц, что делает скин-эффект пренебрежимо малым. Электрический ток пропускали по длине образцов. Форма импульса тока синусоидальная, исключая эффект Томпсона-Пельтье. Температуру СЭТО рассчитывали по закону Джоуля - Ленца.

Проводили электрозакалку и электроотпуск. Перед электроотпуском образцы закаливали в печи. Изучали влияние технологических параметров СЭТО на твердость и удельное электросопротивление сталей. Использовали различное время (температуру) СЭТО, как при электрозакалке, так и при электроотпуске. Изотермическая выдержка образцов не проводилась. При СЭТО с закалкой применяли различные среды охлаждения: воду, масло и воздух. Для сравнения свойств после СЭТО проводили печную закалку по рекомендуемым научно-технической литературой режимам. Энергетические параметры, геометрические размеры образцов, длиной 0,1 м представлены в табл. 1, а исходные свойства стали и свойства после печной термической обработки показаны в табл. 2.

Таблица 1

Энергетические параметры СЭТО стали 8Х6НФТ

Марка	Сечение, мм	Плотность тока, А/м ²	Температура при нагреве за 1 с, °С	Мощность на образце за 1 с, Вт
8Х6НФТ	8 x 2	$1,403 \cdot 10^8$	378	9443

Таблица 2

Твердость (HRC), удельное электрическое сопротивление (R, Ом мм²/м) и относительная ошибка эксперимента (E, %) стали 8Х6НФТ в исходном состоянии и после печной обработки (закалки в печи и охлаждения в масле, отпуск в печи 200 °С два часа)

Марка стали	Исходные		Печная термическая обработка				
	HRC	R	Температура закалки, °С	HRC	R	После отпуска HRC	После отпуска R
8Х6НФТ	22,0(3,57)	5,47(1,99)	950	54,77(1,47)	9,92(2,57)	43,0(12,41)	10,61(1,47)

Для оценки стабильности свойств (разброса значений твердости и удельного электрического сопротивления) проводили вычисления относительной ошибки эксперимента (E, %). Использовали формулу $E = (T / X) 100\%$, где X - среднее арифметическое значение параметра, T – погрешность серии измерений, вычисляемая по формуле $T = (M_{\max} - M_{\min})/2$, M_{\max} - верхний доверительный предел, а M_{\min} – нижний доверительный предел.

На полученных образцах проводили кристаллографические, физические и металлографические исследования.

Кристаллографические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD). Для этого из образцов были вырезаны заготовки и приготовлены микрошлифы поперечного сечения. Для полного снятия деформированного поверхностного слоя образцы были дополнительно отполированы химико-механическим способом на шлифовальной установке «MINIMET 1000» в водном

растворе кремнезема. В процессе исследования были получены карты кристаллографической ориентации образцов после СЭТО и печного нагрева при разных времени (температуре) нагрева и охлаждении в разных средах. Полученные карты кристаллографической ориентации образцов обрабатывались с помощью аналитического пакета «HKL CHANNEL 5».

Результаты эксперимента

Полученные значения твердости и удельного электрического сопротивления стали 8Х6НФТ после СЭТО показаны на рис. 1 и 2. На рис. 1 видно, что с увеличением времени СЭТО значения твердости обрабатываемой стали возрастают. Дальнейшее повышение времени нагрева не вызывает повышения твердости, а ее значения находятся в пределах погрешности эксперимента.

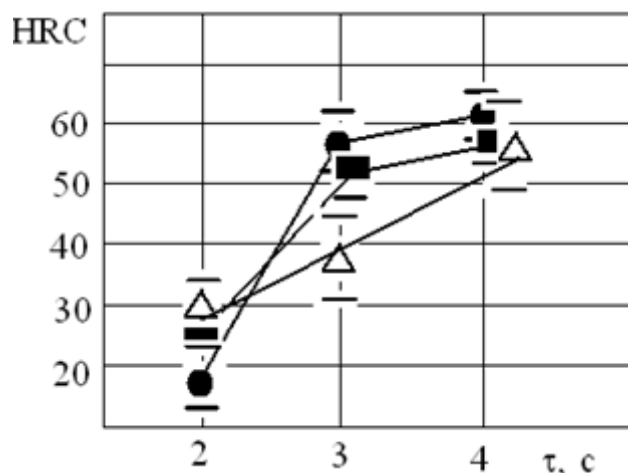


Рис. 1. Твердость HRC стали 8Х6НФТ после СЭТО при разном времени нагрева, среды охлаждения:

● - вода; ■ - масло; △ - воздух

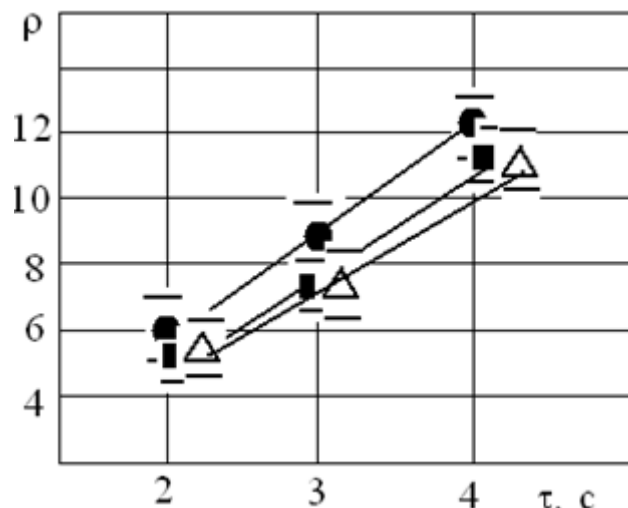


Рис. 2. Удельное электрическое сопротивление ρ (Ом мм²/м) стали 8Х6НФТ после СЭТО при разном времени нагрева, среды охлаждения:

● - вода; ■ - масло; △ - воздух

При охлаждении стали после СЭТО в воде или масле относительная ошибка эксперимента (стабильность свойств) увеличивается. Для образцов, охлаждение которых происходило на воздухе, при максимальном нагреве СЭТО произошла закалка. Здесь значение твердости составляет 57 HRC. При нагреве стали СЭТО ниже A_{c1} наблюдается значительный раз-

брос свойств. При максимальном разогреве стали СЭТО, увеличение скорости охлаждения повышает стабильность твердости.

Сравнение результата измерения твердости после печной закалки в масло табл. 2 и после СЭТО в масло показывает, что величины твердости приблизительно одинаковы и их значения лежат в пределах погрешности эксперимента. При СЭТО наблюдается несколько большая стабильность значений твердости, чем при печном нагреве. При охлаждении на воздухе стабильность твердости после СЭТО минимальная, что объясняется процессом диффузии углерода. В большинстве случаев для исследуемых режимов СЭТО повышение скорости охлаждения увеличивает стабильность твердости, или снижает значение относительной ошибки эксперимента. Это проявляется в тех случаях нагрева, когда время (или температура) СЭТО превышает A_{c1} .

На рис. 2 видно, что увеличение времени обработки СЭТО повышает значение удельного электрического сопротивления исследуемой стали. Рост удельного электрического сопротивления объясняется сокращением карбидной фазы [5]. Такие процессы наблюдаются и при печной обработке в условиях высоких скоростей нагрева под закалку. Увеличение значений удельного электрического сопротивления с ростом времени СЭТО соответствуют изменению твердости. Изменение скорости охлаждения при СЭТО не изменяет поведение относительной ошибки эксперимента (стабильности) значений удельного электрического сопротивления.

Большой интерес представляет СЭТО в режиме отпуска. Для отпуска током высокой плотности использовали образцы исследуемой стали, прошедшие печную закалку в масло табл. 2. При отпуске СЭТО охлаждение проводили на воздухе. Результаты эксперимента представлены табл. 3. Результаты табл. 3 показывают, что при увеличении времени СЭТО отпуска значения твердости изменяются немонотонным образом. Время нагрева СЭТО 1 с соответствует температуре низкого отпуска (табл. 1). Увеличение времени нагрева до 3 с соответствует нагреву до 900 °С, при этом наблюдается закалка на воздухе. Стабильность значений твердости после СЭТО отпуском такая же, как и при печном отпуске. В табл. 4 показано изменение удельного электрического сопротивления при СЭТО отпуском, выполненном на образцах табл. 2 после печной закалки.

Таблица 3

Твердость HRC и относительная ошибка эксперимента E, % стали 8Х6НФТ после печной закалки и последующего отпуска методом СЭТО при разном времени нагрева

Марка Стали	Время СЭТО, с		
	1	2	3
8Х6НФТ	46,0(1,51)	35,50(5,43)	52,33(3,55)

Таблица 4

Удельное электрическое сопротивление (Ом мм²/м) и относительная ошибка эксперимента E, % стали 8Х6НФТ после печной закалки и после СЭТО отпуском при разном времени нагрева

Марка Стали	Время СЭТО, с		
	1	2	3
8Х6НФТ	7,82(2,23)	7,53(8,96)	9,4(2,27)

Данные табл. 4 показывают, что увеличение времени нагрева при СЭТО отпуском повышает значения удельного электрического сопротивления.

На рис. 3 приведены карты кристаллографической ориентации образцов после печного нагрева в 950 °С с охлаждением в масле и последующим отпуске. Высокоугловые границы зерен с углами разориентировок выше 10° на картах отображены толстыми линиями на

рис 3. [11]. Карты ориентации получены при следующем режиме съемки: напряжение на аноде 20 кВ; размер карт 180x180 пикселей.

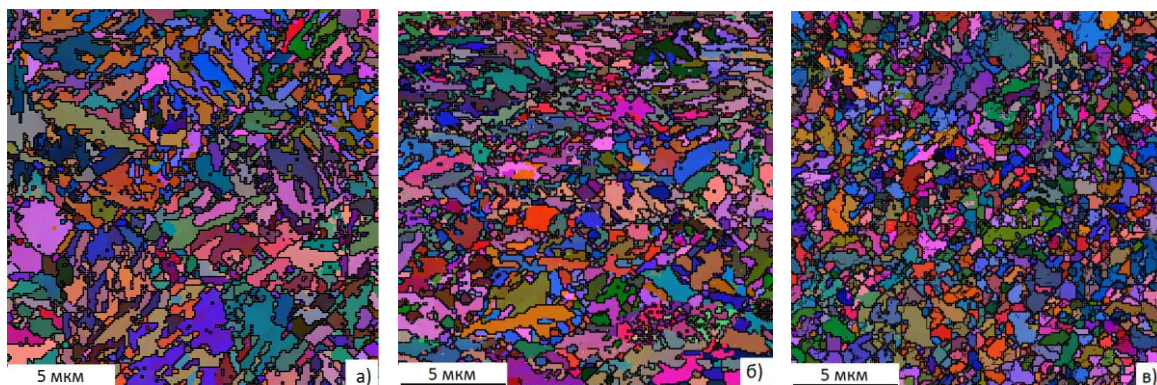


Рис. 3 Изображения карт ориентации образцов после печного нагрева в 950 °С с охлаждением в масле и разными режимами отпуска:
a – печной отпуск 200 °С 2 ч; *б* – СЭТО, время нагрева 1 с; *в* – СЭТО, время нагрева 2 с

На рис. 3, *a* показана структура стали после низкотемпературного печного отпуска в 200 °С, которая представляет собой отпущенный мартенсит. При этом происходит снижение внутренних напряжений при сохранении высокой твердости (табл. 2). Структура стали после отпуска СЭТО при времени нагрева 1 с состоит из троостомартенсита (рис.3, *б*). Нагрев образца при СЭТО в 1 с соответствует температуре среднего отпуска, однако, как видно из табл.3 снижения твердости по сравнению с низкотемпературным печным отпуском не происходит. Температура образца, при времени нагрева СЭТО 2 с, соответствует температуре высокого отпуска. На рис. 3, *б* показана структура стали после высокотемпературного отпуска СЭТО состоящая из сорбита отпуска [18]. При исследовании влияния отпуска методом СЭТО нужно учитывать, что увеличение скорости нагрева при отпуске смещает температуру превращений, происходящих со структурой мартенсита, вверх по температурной шкале. Необходимо отметить, что в отличие от печного отпуска отпуск методом СЭТО осуществляется за очень короткое время (секунды).

Таблица 5

Доля малоугловых и специальных границ в структуре образцов в зависимости от вида ТО, %

Вид отпуска после, печной закалки с 950 С в масло	МУГ, %	Σn , %
Печной отпуск в 200 °С выдержка 2 ч	25,8	22,7
Отпуск СЭТО, время нагрева 1 с	23,4	26,1
Отпуск СЭТО, время нагрева 2 с	20	18,8

Обозначения: Σn – фракция специальных границ; МУГ – фракция малоугловых границ

Был проведен анализ зернограницной и субграницной структуры образцов после печного отпуска и отпуска по технологии СЭТО. В табл. 5 приведены данные по доле малоугловых и специальных границ в микроструктуре образцов после ТО, рассчитанные по данным анализа карт кристаллографической ориентации.

Из табл. 5 видно, что с увеличением температур отпуска происходят незначительные изменения субграницной и зернограницной структуры стали. Субграницная и зернограницная структура стали образовавшиеся при печном отпуске близка структуре после отпуска ме-

тодом СЭТО, хотя температура отпуска методом СЭТО значительно выше. Большую часть специальных границ представляют фракции у которых число узлов решетки металла, приходящихся на один совпадающий узел в общей сверхрешетке, равно 3 ($\Sigma 3$). Необходимо отметить, что представленные данные по доле малоугловых границ несколько занижены, поскольку при построении карт разориентировок не учитывали малоугловые границы рек с разориентировкой менее 2° . Однако такой метод анализа структурных изменений имеет высокую достоверность, которая определяется большим массивом экспериментальных точек.

Несмотря на то, что характерной термообработкой для инструментальных сталей является закалка и низкий отпуск, проведенные исследования показали, что отпуск методом СЭТО даже с завышением температуры благоприятно влияет на свойства и структуру стали.

Исходя из того, что термическая обработка характерная для инструментальных сталей состоит из закалки и низкого отпуска. Теоретический и практический интерес представляет экспериментальное исследование влияния печного низкого отпуска на свойства закаленной СЭТО исследуемой стали. Образцы, имеющие свойства рис. 1 и 2, подвергли печному отпуску при 200°C длительностью два часа. Свойства (твердость и удельное электрическое сопротивление) образцов закаленных СЭТО и подвергнутых последующему печному отпуску представлены на рис. 4 и 5.

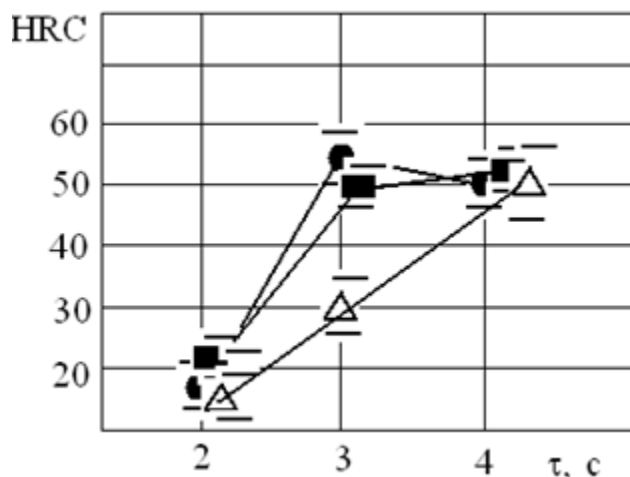


Рис. 4. Твердость HRC стали 8Х6НФТ после СЭТО при разном времени нагрева и разной среды охлаждения и печного отпуска при 200°C за два часа,

среды охлаждения: ● - вода; ■ - масло; △ - воздух

На рис. 4 видно, что низкий печной отпуск после СЭТО в режиме закалки привел к снижению твердости, в сравнении с данными рис.1. Относительная ошибка эксперимента при этом возрастает незначительно. Отметим, что при СЭТО в режиме отпуска такого явления не наблюдается. В целом стабильность твердости такая же, как и в случае печных операций (табл. 2), несмотря на повышение температуры отпуска. Данные рис. 5. показывают, что последующий печной отпуск после СЭТО закалкой не снижает значение удельного электрического сопротивления.

На рис. 6, 7 и 8 приведены карты кристаллографической ориентации образцов после СЭТО с охлаждением в разных средах и последующем отпуске в 200°C . Высокоугловые границы зерен с углами разориентировок выше 10° на картах отображены толстыми линиями. Карты ориентации получены при следующем режиме съемки: напряжение на аноде 20 кВ; размер карт 180x180 пикселей.

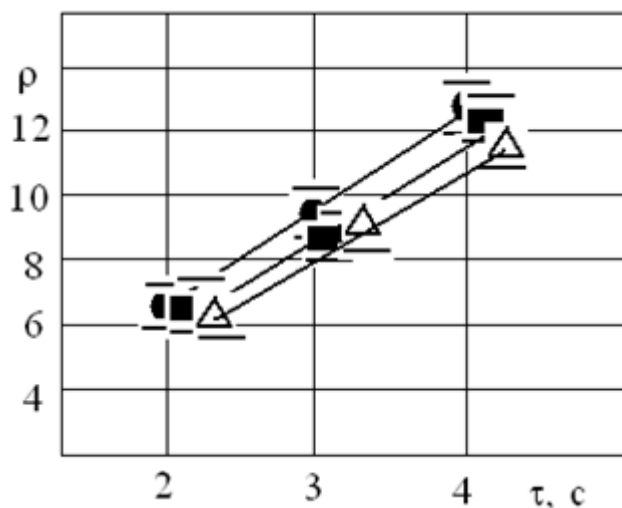


Рис. 5. Удельное электрическое сопротивление ρ (Ом мм²/м) стали 8Х6НФТ после СЭТО при разном времени нагрева и разной среды охлаждения и печного отпуска при 200 °С за два часа, среды охлаждения: ● - вода; ■ - масло; △ - воздух

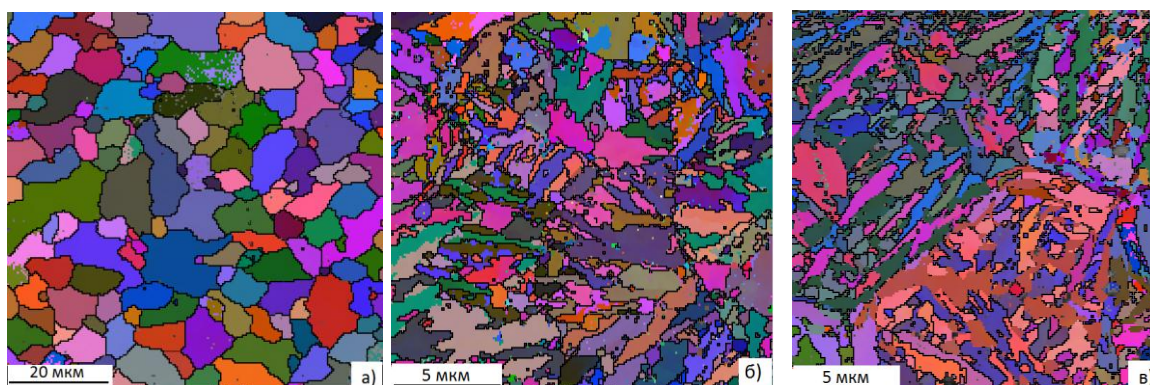


Рис. 6. Изображения карт ориентации образцов после СЭТО с охлаждением на воздухе и последующим отпуске 200 °С: а – время нагрева 2 с; б – время нагрева 3 с; в – время нагрева 4 с

Таблица 6

Доля малоугловых и специальных границ в структуре образцов в зависимости от вида ТО, %

Вид термообработки, СЭТО с охлаждением на воздухе и последующем печном отпуске в 200 °С	МУГ, %	Σn, %
Время нагрева 2 сек	2,4	11,7
Время нагрева 3 сек	25	21,1
Время нагрева 4 сек	21	24,4

На рис. 6 видно, что структура образца после СЭТО с временем нагрева 2 с состоит из почти равноосных зерен феррито-цементитной смеси. При времени нагрева от 3 с и охлаждением на воздухе в структуре стали происходит образование мартенситной фазы. Которая при последующем отпуске в 200 °С представляет собой структуру отпущенного мартенсита. Анализ структуры показал что, с увеличением времени нагрева (температуры) происходят значительные изменения зернограницной и субграницной структуры (табл. 6).

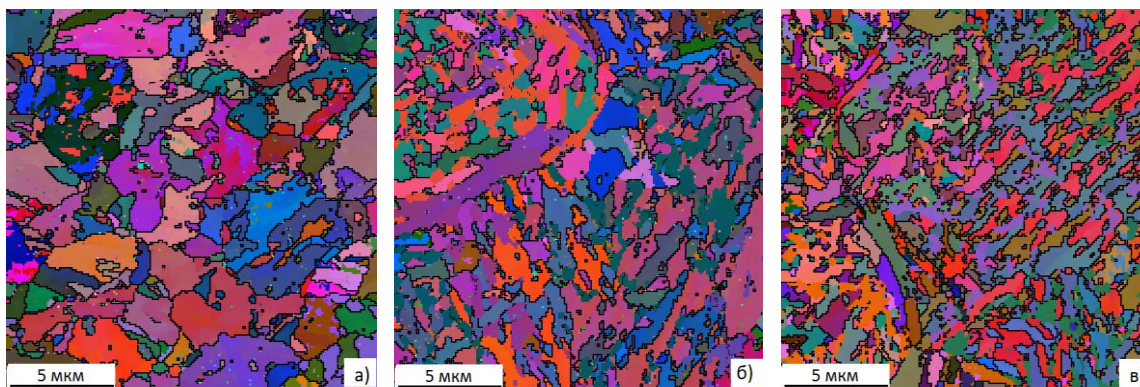


Рис. 7. Изображения карт ориентации образцов после СЭТО с охлаждением в масле и последующим отпуске 200 °С:

а – время нагрева 2 с; *б* – время нагрева 3 с; *в* – время нагрева 4 с

На рис. 7 показана микроструктура образцов после закалки методом СЭТО с временем нагрева от 2 с и последующего низкого отпуска, представляющая собой отпущенный мартенсит. В табл. 7 представлены данные по параметрам зернограницной и субграницной структуры, а именно доля малоугловых и специальных границ.

Таблица 7

Доля малоугловых и специальных границ в структуре образцов в зависимости от вида ТО, %

Вид термообработки, СЭТО с охлаждением в масле и последующем печном отпуске в 200 °С	МУГ, %	Σn , %
Время нагрева 2 сек	41,6	11,2
Время нагрева 3 сек	29	22,9
Время нагрева 4 сек	25	28,2

На рис. 8 показана микроструктура образцов после закалки методом СЭТО с охлаждением в воде и последующего низкого отпуска. В табл. 8 представлены данные по доле малоугловых и специальных границ.

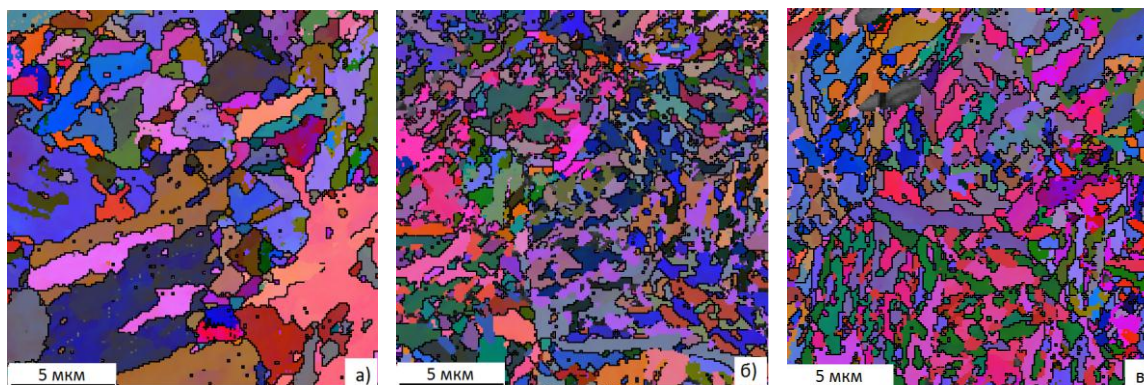


Рис. 8 Изображения карт ориентации образцов после СЭТО с охлаждением в воде и последующим отпуске 200 °С:

а – время нагрева 2 с; *б* – время нагрева 3 с; *в* – время нагрева 4 с

Микроструктура образцов из стали 8Х6НФТ, подвергнутых термообработки в виде закалки методом СЭТО с временем нагрева равным 2 с и охлаждением в воде и масле, представляет собой феррито-цементную смесь. Образовавшееся структура характеризуется большим значением малоугловых границ и малым значением специальных границ. При времени нагрева от трех секунд структура данных образцов представляет собой мартенсит. Последующее проведение низкого отпуска переводит мартенсит закалки в отпущенный мартенсит. При этом снижаются закалочные макронапряжения, повышается прочность и немного улучшается вязкость, без заметного снижения твердости [18]. Структура образцов после закалки методом СЭТО с временем нагрева от 3 с характеризуется уменьшением доли малоугловых границ и ростом доли специальных границ, чем структура после СЭТО с временем нагрева 2 с.

Таблица 8

Доля малоугловых и специальных границ в структуре образцов в зависимости от вида ТО, %

Вид термообработки, СЭТО с охлаждением в воде и последующем печном отпуске в 200 °С	МУГ, %	Σn , %
Время нагрева 2 сек	45,4	9
Время нагрева 3 сек	21,8	24,7
Время нагрева 4 сек	24,1	23,7

Металлографические исследования проводили на образцах после СЭТО и печного нагрева закаленных в масле. Следов перегрева и пережога, проплавлений и трещин, вызванных высокой скоростью нагрева СЭТО, на изученных металлографическим способом образцах не обнаружено.

Выводы

1. Применение технологии СЭТО для проведения отпуска исследуемых образцов не приводит к значительному снижению значений твердости, не смотря на завышение температуры отпуска, сохраняя тем самым высокую износостойкость материала.

2. Микроструктуры образцов после печной закалки с 950 °С и закалки СЭТО (время нагрева 3 с) с охлаждением в масле и последующим отпуске в 200 °С имеют схожее зернограничное и субграничное строение, однако значение твердости образцов при закалке СЭТО выше.

3. Несмотря на значительное завышение температуры закалки при СЭТО и высокие скорости нагрева, микроструктура образцов не имеет следов перегрева и пережога и других нежелательных дефектов.

4. Проведенные исследования по определению влияния режимов СЭТО на структуру и свойства стали 8Х6НФТ позволяют выбрать оптимальный режим термообработки и получить материал с заданными характеристиками.

5. Применение СЭТО позволяет проводить операции объемного упрочнения стали за короткое технологическое время (за секунды).

Библиографический список

1. Мешков, Ю. Я. О причинах подавления отпускной хрупкости в сталях при скоростном электроотпуске / Ю. Я. Мешков, И. С. Стаценко, В. Д. Безбах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1994. №2. С. 15–17.
2. Гриднев, В. Н. Применение скоростной термической обработки для повышения конструктивной прочности сталей / В. Н. Гриднев, С. П. Ошкадеров // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1987. № 11. С. 19–23.

3. **Рыш, П.** Влияние скоростной аустенизации на вязкость разрушения конструкционных сталей / П. Рыш, Ф. Габровец, И. Шкарек // *Металлофизика*. 1986. Т. 8. № 6. С. 55–61.
4. **Шкляр, В. С.** О влиянии электрического поля на металл / В. С. Шкляр, С. В. Терехов // *Металлы*. 1997. № 2. С. 148–151.
5. **Гофман, Ю. И.** Образование неустойчивых Френкелевских пар при облучении электронами / Ю. И. Гофман, А. И. Кидин, О. Г. Оленик // *Металлы*. 1995. № 6. С. 153–157.
6. **Гордеев, В. Ф.** О рекристаллизации металлов под действием электрического тока / В. Ф. Гордеев, Г. М. Кудинов, А. В. Пустагаров // *Металлы*. 1990. № 3. С. 120–122.
7. **Мальцев, И. М.** Скоростная электротермическая обработка током высокой плотности доэлектродных конструкционных сталей // *Вопросы материаловедения*, 2004. № 4 (40). С. 24–31.
8. **Мальцев, И. М.** Изменение стабильности и свойств алюминиевых сплавов после скоростной электротермической обработки током высокой плотности // *Материаловедение*. 2004. № 9. С. 34–36.
9. **Мальцев, И. М.** Скоростная обработка стали 30ХГСА током высокой плотности // *Материаловедение и термическая обработка металлов* 2009. № 6. С. 42–45.
10. **Мальцев, И. М.** Исследование скоростной электротермической обработки металлов током высокой плотности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2005. № 11. Т. 71. С. 35–38.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

B.V. Ustinov, E.N. Grishin, A.A. Aushev, I.M. Mal'tsev

RESEARCH OF INFLUENCE PHYSICAL-TREATMENT OF SPEED ELECTROTHERMAL PROCESSING BY CURRENT OF HIGH DENSITY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF 8H6NFT TOOLS STEEL

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Time effect of electrophysical factor of high-speed electric impulse heating by high-density current of 10^8 - 10^9 A/m² on 80X6HFT steel structure and properties is studied. Crystallographic examination with an electronic scanning microscope according to the back-scattered electrons diffraction (EBSD) method was effected. Microstructural examination results are presented. Application of high-speed electrothermic treatment technology for the studied samples tempering leads to a sufficient decrease of hardness values, despite the uprated tempering temperature, at this maintaining high wearability of the material. The microstructures of the samples after furnace tempering at 950 °C and high-speed electrothermic treatment (3 seconds heating), then being oil-cooled and successively drawn back at 200 °C have related grain boundary and subboundary characters, samples tempered by the high-speed electrothermic treatment method still having higher hardness values. Despite sufficient uprate of the tempering temperatures at the high-speed electrothermic treatment and also high heating speeds, the samples microstructure has no trace of overheating and overburning, and other unacceptable defects.

Key words: high-speed electrothermic treatment, steel, high-density current, structure and properties, low-angle boundaries, special boundaries, electrophysical methods of metallic materials treatment.