

# ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Пустовойт В.Н.<sup>1</sup>, Долгачев Ю.В.<sup>2</sup>, Орехова А.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Пустовойт Виктор Николаевич - доктор технических наук, профессор;

<sup>2</sup>Долгачев Юрий Вячеславович - кандидат технических наук, доцент;

<sup>3</sup>Орехова Анастасия Геннадьевна – студент,

кафедра физического и прикладного материаловедения, факультет управления подготовки кадров высшей квалификации,

Донской государственной технической университет,

г. Ростов-на-Дону

**Аннотация:** в статье анализируются изменения кинетики мартенситного превращения под действием внешнего магнитного поля и вызванные этим структурные изменения, влияющие на механические и физические свойства, а также изменение фазового состава закаленной стали.

**Ключевые слова:** анализ, магнитное поле, мартенситное превращение, механические и физические свойства, фазовый состав, закалка, состав стали.

Термическая обработка металлических сплавов в магнитном поле (ТОМП) относится к комбинированным способам воздействия на структуру. Особенность такого метода состоит в использовании энергии внешнего магнитного поля (постоянного, переменного или импульсного) для воздействия на термодинамику, механизм и кинетику фазовых переходов с целью получения устойчивых изменений структуры и свойств, полезных для эксплуатации [1-8].

Изменение кинетики мартенситного превращения под действием внешнего магнитного поля и вызванные этим структурные изменения оказывают влияние на механические и физические свойства, а также приводят к изменению фазового состава закаленной стали.

Для опытной проверки ожидаемого повышения характеристик пластичности при закалке в магнитном поле, позволяющего реализовать высокую прочность мартенсита, были проведены статические испытания на растяжение полированных образцов сталей 45X и 30XГСА.

Таблица 1. Механические свойства сталей

Сталь	Температура нагрева, °С	Механические свойства <sup>1</sup>	
		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$
		МПа	
45X	850	$856 \pm 56$	–
		$1363 \pm 68$	$1300 \pm 68$
30XГСА	860	$925 \pm 50$	–
		$1417 \pm 77$	$1348 \pm 79$

<sup>1</sup>Числитель – без магнитного поля, знаменатель – в поле напряженностью 1,87 МА/м

Данные табл. 1, полученные при испытании 25 образцов на каждом режиме с учетом доверительной вероятности 0,95, свидетельствуют о повышении механических свойств после закалки в магнитном поле. На диаграмме растяжения образцов, закаленных в магнитном поле, появляется участок, соответствующий равномерной деформации, что позволяет определить для этого случая условный предел текучести. Наблюдение строения поверхностей излома (рис. 1) показывает, что в обоих случаях происходит разрушение квазисколом, однако если при закалке без поля преобладает разрушение с образованием фасеток отрыва с ручейковым узором, то вид поверхности излома образцов после закалки в магнитном поле свидетельствует об увеличении степени участия пластической деформации в процессе разрушения.

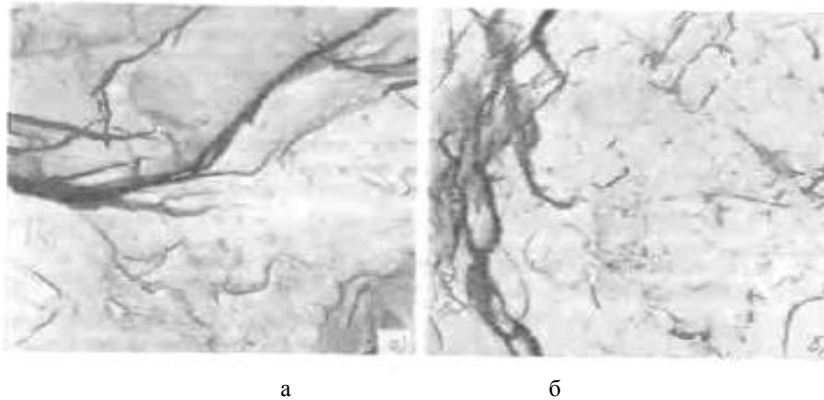


Рис. 1. Фрактограммы стали 45X, x5000: а - закалка без поля; б - закалка в магнитном поле

Таким образом, повышение пластичности, вызванное совокупностью структурных изменений при мультипликативном зарождении кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора, позволяет реализовать высокую прочность мартенсита ТОМП; при этом экспериментально наблюдается повышение временного сопротивления на 500 МПа и появление заметного равномерного сужения.

На рис. 2 представлены данные о влиянии магнитного поля на магнитном поле и увеличением количества мартенситной фазы в высокоуглеродистых сплавах железа.

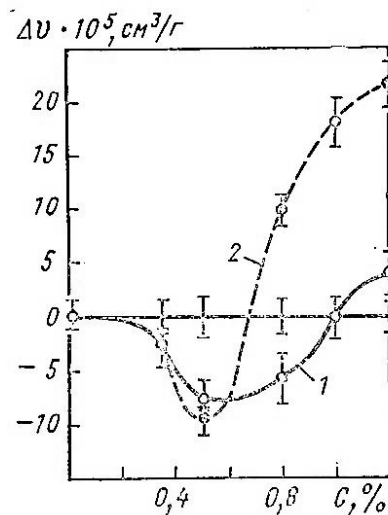


Рис. 2. Изменение удельных объёмов железоуглеродистых сплавов при закалке в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м: 1 - от 500°C; 2 - от 1000°C

При сопоставлении данных рис. 1 и 2 можно сделать заключение, что изменение объемного эффекта, вызванное приростом под действием магнитного поля количества мартенситной фазы, превалирует над изменением объемного эффекта, обусловленного ее распадом в процессе закалочного охлаждения. Результаты КСФА сталей 45, У8 и У12 после закалки без поля и в поле показаны на рис. 3 - 4. Полученные данные наглядно иллюстрируют изменения в фазовом составе и распределении углерода по состояниям, вызванные действием магнитного поля, свидетельствуют об усилении степени расслоения мартенсита по углероду в результате распада твердого раствора («in statu nascendi»). Усиление распада мартенсита при закалке в магнитном поле приводит к увеличению количества углерода, связанного с дефектами, для всех исследуемых сталей и образованию высокодисперсных частиц карбидной фазы в сплавах с  $M_n > 200^\circ\text{C}$ .

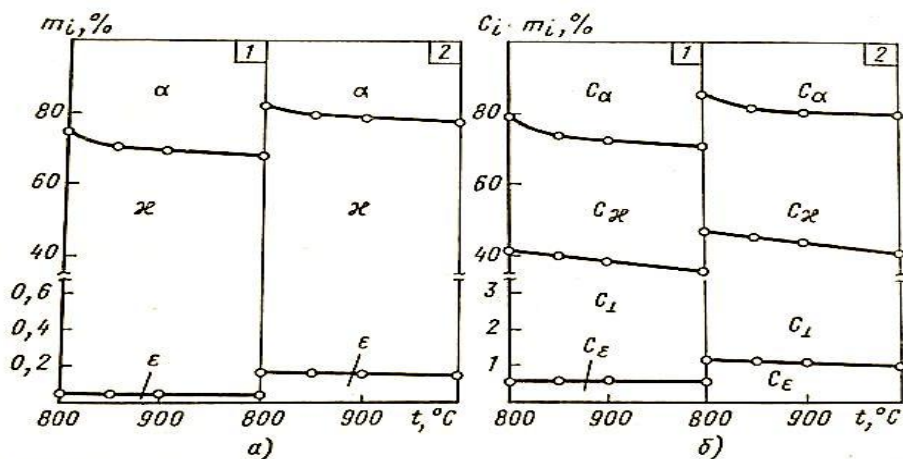


Рис. 3. Диаграммы фазового состава (а) и распределения углерода (б) стали 45:  
1 – закалка без поля; 2 – закалка в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Таким образом, по результатам исследования влияния магнитного поля на условия реализации мартенситного превращения железоуглеродистого аустенита можно сделать следующие заключения. Воздействие внешним полем в процессе закалочного охлаждения, с одной стороны, снижает энергию образования мартенситного зародыша в матричной фазе, а с другой стороны, влияет на процессы роста кристаллов мартенсита.

Мультипликативное зарождение кристаллов мартенсита [9-14] в районе  $M_n$ , а также снижение под действием поля охлаждающей способности закалочных жидкостей в интервале  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения увеличивает длительность пребывания значительного количества «раннего» мартенсита магнитной закалки в районе относительно высоких температур.

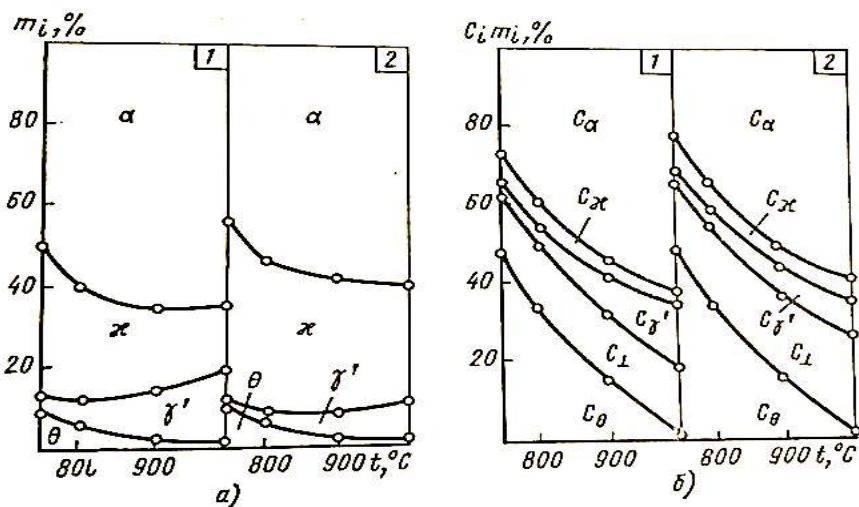


Рис. 4. Диаграммы фазового состава (а) и распределения углерода (б) стали У12А:  
1 – закалка без поля; 2 – закалка в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Это способствует протеканию процессов распада твердого раствора, вследствие чего наблюдается усиление сегрегации углерода на структурных дефектах и выделение высокодисперсных карбидных частиц, т. е. увеличение степени распада мартенсита по двухфазному механизму, возникновение тонкого расслоения по углероду. В результате закалки в магнитном поле фиксируется структурное состояние, свойственное стали после обычной закалки отпуска при 120-150°C.

На рис. 5 приведены результаты рентгеноструктурных исследований, которые осуществлены при поточечном сканировании профилей рентгеновской дифракционной линии  $\{211\}$  мартенсита углеродистых сталей после обычной закалки и закалки в магнитном поле с различных температур аустенитизации. При этом использована методика гармонического анализа профиля рентгеновских дифракционных линий (РДЛ), в которой представление профиля и разложение его на компоненты содержит в основе Фурье-анализ.

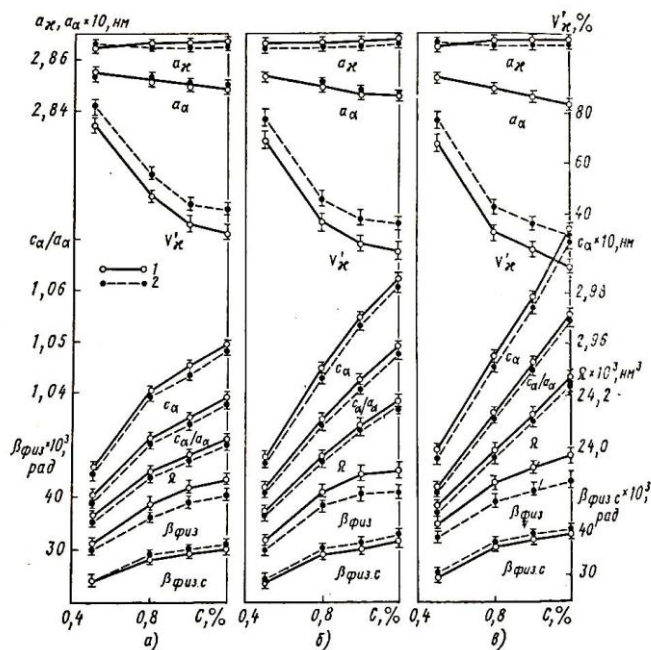


Рисунок 5. Влияние магнитного поля на изменение параметров структуры углеродистого мартенсита при температурах закалки (а) 800, (б) 900 и (в) 1000°С:

1 – закалка без поля; 2 – закалка в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Рассмотрение данных на рис. 5 дает основание полагать, что после обычной закалки происходит своеобразное концентрационное расслоение  $\alpha$ -твердого раствора по углероду, в результате которого образуются микрообъемы с тетрагональной (собственно  $\alpha$ -мартенсит) и близкой к кубической, слаботетрагональной решеткой ( $\chi$ -мартенсит). Влияние магнитного поля сводится в основном к увеличению объемной доли  $\chi$ -мартенсита, т.е. усилению степени двухфазного распада в период закалочного охлаждения. Так, в результате воздействия магнитного поля при закалке стали У12 от 1000 °С количество  $\chi$ -мартенсита увеличивается от 20 до 32%. Вместе с тем при закалке в магнитном поле наблюдается уменьшение параметров решетки  $a_x$  и  $c_a$ . Первое косвенно подтверждает усиление степени двухфазного распада, а второе свидетельствует о появлении тенденции к протеканию однофазного распада мартенсита (а не процесса разупорядочения) вследствие пропорциональности изменений степени тетрагональности и объема элементарной ячейки  $\alpha$ -мартенсита, а также отсутствия изменений (в пределах точности измерений) параметра  $a_a$  при закалке в магнитном поле.

**Выводы.** Таким образом, после закалки в магнитном поле увеличивается число препятствий, оказывающих барьерное действие при движении дислокаций. Характерно, что большинства этих препятствий полупроницаемые (малоугловые границы между рейками, среднеугловые пакетные границы, когерентные матрицы дисперсные частицы карбидов), что облегчает релаксацию «пиковых» напряжений путем эстафетной передачи деформации в соседние объемы. Меньшая степень затрудненности в развитии пластической деформации является также следствием общего диспергирования структуры и увеличения объемной доли низкоуглеродистого  $\chi$ -мартенсита после закалки в магнитном поле.

Совокупность структурных изменений после закалки в магнитном поле обеспечивает большой запас пластичности, что повышает реализуемую прочность в закаленном состоянии и, по-видимому, делает возможным получение максимальной прочности при более низких температурах отпуска.

#### Список литературы

1. Счастливец В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А., Мирзаев Д.А. Влияние внешних воздействий и магнитного поля на мартенситное превращение в сталях и сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2016. № 5 (731). С. 3-9.
2. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Особенности структуры мартенсита, полученного при закалке стали в магнитном поле в температурном интервале сверхпластичности аустенита // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2011. № 11 (677). С. 3-7.
3. Гришин С.А. Повышение конструкционной прочности сталей термической обработкой в магнитном поле. Ростов-на-Дону: Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова – филиал «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 2015. - 81 с.

4. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В.* Зарождение мартенсита в условиях сверхпластичности аустенита и воздействия внешнего магнитного поля // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2016. № 2 (181). С. 114-120.
5. *Счастливец В.М., Мирзаев Д.А., Калетина Ю.В., Фокина Е.А.* Природа влияния магнитных полей на температуру начала мартенситного превращения в сплавах железа // Физика твердого тела, 2016. Т. 58. № 2. С. 327-335.
6. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В.* Технология бездеформационной закалки в магнитном поле тонкостенных деталей кольцевой формы // Вестник Донского государственного технического университета, 2011. Т. 11. № 7 (58). С. 1064-1071.
7. *Калетина Ю.В., Фокина Е.А.* Влияние магнитного поля на количество остаточного аустенита в закаленных сталях // Металловедение и термическая обработка металлов, 2008. № 10 (640). С. 27-33.
8. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Рожкова В.М.* Энергетические особенности образования зародышей мартенсита и кинетика гамма-альфа перехода при действии внешнего магнитного поля // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2015. № 5 (160). С. 131-135.
9. *Счастливец В.М., Гундырев В.М., Зельдович В.И.* О механизме мартенситного превращения в среднеуглеродистой стали и железо-никелевом сплаве // В книге: Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. Материалы XXIV Уральской школы металлочедов-термистов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2018. С. 14-15.
10. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В.* О природе мест зарождения мартенсита при закалке стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2019. Т. 62. № 2. С. 109-114.
11. *Салынских В.М., Щербакова Е.Е., Арефьева Л.П.* Улучшение механических свойств пружин из стали 65г изотермической закалкой // Молодой исследователь Дона, 2018. № 2 (11). С. 77-80.
12. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В.* К вопросу о местах зарождения мартенсита // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2014. № 23 (150). С. 110-114.
13. *Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В.* Структура, фазовый состав, механические свойства и износостойкость стали после микродугового борванадирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2019. Т. 62. № 6. С. 446-451.
14. *Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М., Корнилов Ю.А.* О местах сдвигового образования зародышей при фазовых превращениях в стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2018. Т. 61. № 2. С. 114-119.