

УДК 621.745.55

Заблоцкий В. К., Шимко В. И., Шимко А. И., Фельдман В. Е.

ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛИ 45

Любой режим термической обработки состоит из трех стадий: нагрев, выдержка и охлаждение [1]. При нагреве важна скорость нагрева, обеспечивающая равномерное распределение температуры по сечению изделия, исключая образование трещин в случае большой разности температур между поверхностью и сердцевиной изделия. Температура нагрева находится относительно критических точек A_3 и A_1 в зависимости от видов термической обработки. Выдержка зависит от скорости фазовых превращений, которая определяется степенью перенагрева выше критической точки и дисперсностью исходной структуры. Стадия охлаждения является наиболее важной для получения требуемых свойств в готовых изделиях. В зависимости от скорости охлаждения на третьей стадии происходит множество структурно-фазовых превращений, которые определяют уровень свойств в сталях.

Для прогнозирования структурно-фазовых превращений сталей при охлаждении используют диаграммы термокинетического превращения аустенита при непрерывном охлаждении и диаграммы изотермического превращения аустенита [2]. Однако соответствующие линии на термокинетических диаграммах располагаются правее и ниже аналогичных линий изотермической диаграммы. Это свидетельствует о том, что для одинакового развития превращения при непрерывном охлаждении требуется больше времени, чем в случае изотермического распада переохлажденного аустенита.

Применение расчетных методов для определения скоростей охлаждения путем нанесения этих скоростей на диаграмму изотермического превращения аустенита позволяет судить о кинетике и температурных интервалах распада аустенита в процессе его охлаждения с той или иной скоростью [3, 4]. Указанные диаграммы строят с использованием небольших образцов (диаметром до 3 мм и длиной до 30 мм), а поэтому при их практическом применении в промышленности, возникают трудности при учете массы изделий. Сведения о таком учете при разработке различных режимов термической обработки в литературе отсутствуют.

Вместе с тем в литературе имеются сведения, что при охлаждении образцов различной массы в условиях всестороннего равномерного охлаждения температура перлитного превращения повышается с увеличением массы образцов, а продолжительность перлитного превращения увеличивается [5].

Целью данной работы является исследование особенностей превращения при охлаждении сталей в процессе термообработки, а также свойств образовавшихся структур.

Экспериментальные кривые охлаждения, полученные в логарифмическом вычислении времени, были нанесены на диаграмму изотермического превращения аустенита, построенную в работе [2]. Эта диаграмма (на рис. 2) является типичной для доэвтектоидных сталей. На ней имеется только область диффузионных превращений аустенита в ферритно-цементитные смеси. Эти превращения характеризуются тремя изогнутыми линиями. Крайне левая из них характеризует собой границу предварительного выделения феррита из аустенита. Если следовать расположению этой линии, то выделение феррита из аустенита начинается в области межкритических температур, именно от A_3 (A_{r3}) до A_1 (A_{r1}). Затем при охлаждении ниже A_{r1} выделение феррита из неустойчивого аустенита начинается по крайней левой линии и происходит в интервале температур между первой и второй линиями. При температурах второй линии начинается превращение аустенита, которое завершается при температурах третьей линии. Структуры, которые образуются в результате этого превращения тем дисперснее, чем ниже температура превращения. В структурах, образовавшихся в результате изотермического превращения аустенита, выделение феррита располагается по границам зерен феррито-цементитных смесей (перлита, сорбита, троостита).

Для построения кривых охлаждения изготавливали образцы из катаных заготовок диаметром 70 мм из стали 45 стандартного состава. Образцы имели длину 70 мм и диаметр от 20 до 60 мм, (через каждые 10 мм). На одной из торцевых сторон каждого образца высверливали отверстие диаметром 5 мм и глубиной 20 мм, для помещения в них термопары. Вторая торцевая сторона образцов применялась для исследования структуры. Образцы нагревали в лабораторной термической печи по ее мощности. После выдержки каждого из образцов при температуре 860 °С в течение 30 мин их охлаждали в сыпучем графите с начальной температурой +20 °С. В процессе нагрева и охлаждения образцов с применением ХА-термопары и графопостроителя Н307/1 фиксировали изменение температуры в реальном времени, а затем строили графики изменения температур в логарифмическом исчислении времени. Такой подход оправдан, поскольку на диаграммах изотермического превращения аустенита время указывается в логарифмической шкале.

После охлаждения указанных образцов в сыпучем графите из них изготавливали образцы для определения характеристик прочности и пластичности при растяжении на установке Р100. В табл. 1 приведены средние значения свойств трех образцов после каждого режима охлаждения. Общий вид диаграммы изотермического превращения с нанесенными скоростями охлаждения образцов диаметром 20, 30, 40, 50 и 60 мм с температуры аустенитизации 860 °С приведен на рис. 1.

Как следует из рис. 1, в процессе охлаждения стали 45 при достижении температуры начала выделения феррита (A_{r3}) изменяется характер кривой охлаждения в сторону замедления скорости охлаждения, что можно объяснить образованием внутреннего тепла при выделении феррита из аустенита. Внутреннее тепло в данном случае должно быть связано с выделением внутренней энергии, которая образуется вследствие $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения по границам зерен. Выделение феррита на данной кривой охлаждения не прекращается при достижении линии температур начала превращения аустенита в перлит на диаграмме изотермического превращения аустенита. Это дополнительно подтверждает тот факт, что при непрерывном охлаждении превращения в стали протекают медленнее, чем при изотермической выдержке.

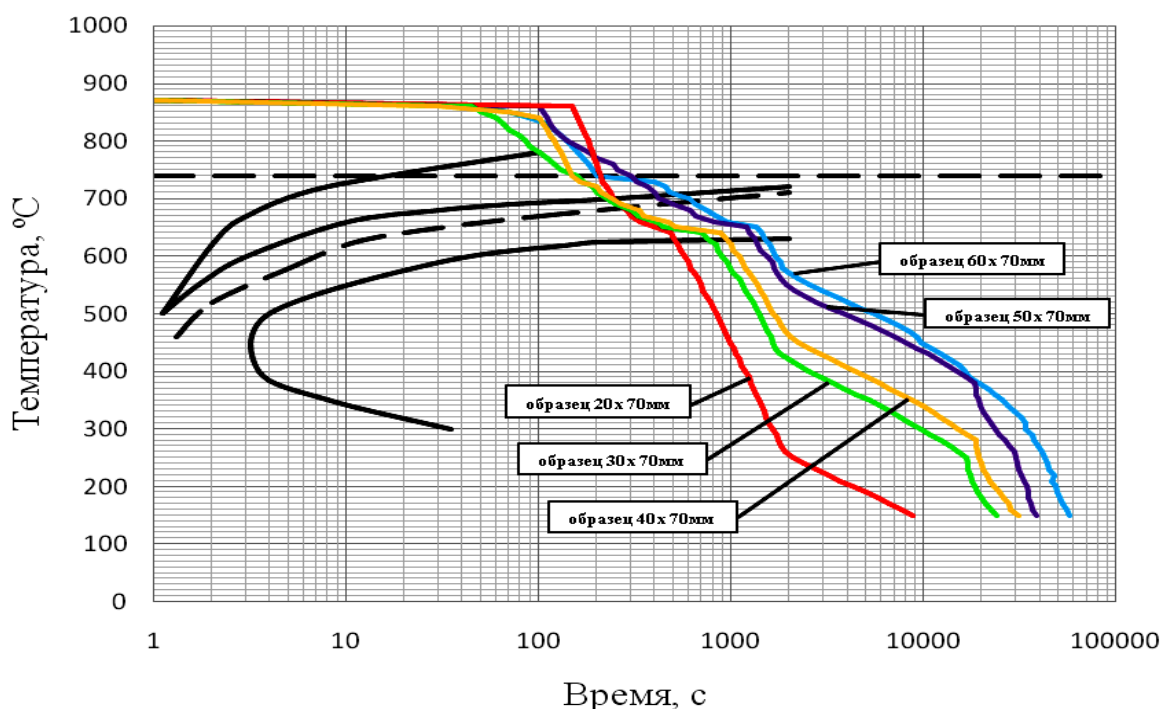


Рис. 1. Диаграмма изотермического распада аустенита для стали 45 с нанесенными кривыми охлаждения

Сам процесс образования перлита происходит при постоянной температуре, о чем свидетельствует горизонтальная площадка на кривой охлаждения, расположенная близко к температуре конца образования перлита на диаграмме изотермического превращения аустенита. Неизменность температуры при увеличении продолжительности охлаждения вызвана компенсацией потерь тепла в окружающую среду за счет тепла, которое выделяется при превращении аустенита в перлит. Отсюда следует, что конец перлитного превращения в изотермических условиях совпадает с температурой перлитного превращения при непрерывном охлаждении. После завершения процесса образования перлита происходит дальнейшее охлаждение феррито-цементитной структуры.

Как следует из рис. 1 и табл. 1, для всех образцов с увеличением их диаметра уменьшается интервал температур существования аустенитного состояния ($A_{C3} - Ar_3$) при охлаждении. Для образца диаметром 20 мм при охлаждении аустенитное состояние сохраняется от 870 до 690 °С, т. е. в интервале 180 °С.

Таблица 1

Параметры охлаждения образцов при самоотжиге стали 45 [5]

Диаметр образцов, мм	Стадии охлаждения	Параметры охлаждения			
		Интервал температур, °С		Продолжительность, с	Средняя скорость, °С/ч
		от	до		
20	1	870	690	255	2541
	2	690	650	145	933
	3	650	640	85	423
	4	640	150	8300	213
30	1	870	700	225	2719
	2	700	650	215	837
	3	650	640	275	130
	4	640	150	23120	76
40	1	870	720	200	2700
	2	720	650	310	690
	3	650	640	365	98,6
	4	640	150	30325	58,2
50	1	870	740	200	2340
	2	740	660	525	548
	3	660	650	375	96
	4	650	150	37100	48
60	1	870	740	200	2340
	2	740	660	750	384
	3	660	650	400	90
	4	650	150	55910	32

Для образца диаметром 60 мм аналогичный интервал пребывания стали в аустенитном состоянии находится в интервале от 870 до 740 °С или по разности температур 130 °С. Скорость охлаждения при этом уменьшается с увеличением диаметра образцов от 2541 °С/с для образца диаметром 20 мм до 2340 °С/с для образца диаметром 60 мм. Отсюда можно сделать вывод, что скорость охлаждения стали в аустенитном состоянии незначительно зависит от массы образцов. Температура начала выделения феррита из аустенита (Ar_3) тем ниже, чем меньше диаметр образца. Она ниже всего у образцов диаметром 20 мм (690 °С) и выше у образца диаметром 60 мм (740 °С). Феррит выделяется из аустенита в образце диаметром 20 мм

в интервале температур от 690 (A_{r3}) до 650 °С (A_{r1}), а в образе диаметром 60 мм соответственно в интервале температур от 740 до 660 °С. Следовательно, при охлаждении температурный интервал выделения феррита из аустенита увеличивается с уменьшением скорости охлаждения, он составляет 40 °С для образца диаметром 20 мм и 80 °С для образца диаметром 60 мм.

Перлитное превращение для всех образцов происходит почти в одинаково узком интервале температур 650–640 °С для образца диаметром 20 мм и 660–650 °С для образца 60 мм. Продолжительность перлитного превращения увеличивается с увеличением диаметра образцов (рис. 2). Это можно объяснить тем, что по мере увеличения диаметра образцов увеличивается доля аустенита, участвующего в перлитном превращении, обусловленная массой металла. Характерно, что для всех образцов температура конца перлитного превращения на кривых охлаждения совпадает с линией температур конца перлитного превращения на диаграмме изотермического превращения переохлажденного аустенита. Такое совпадение может быть связано с генетической природой стали 45, обусловленной содержанием в ней углерода.

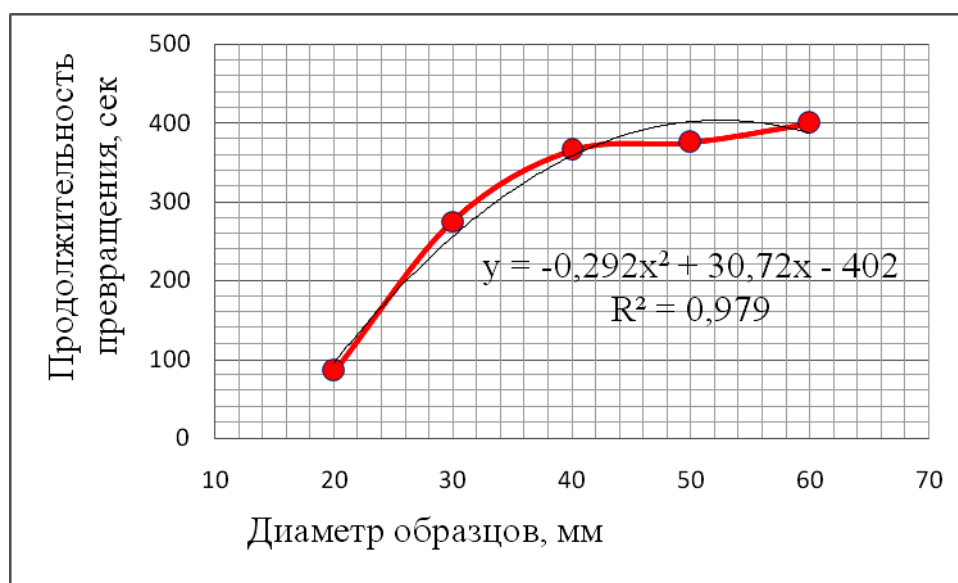


Рис. 2. Продолжительность перлитного превращения в зависимости от диаметра образцов

Полученные данные позволяют объяснить некоторые структурные изменения после полного охлаждения стали 45, в частности, различие в величине зерна перлита и характере распределения феррита.

Скорость охлаждения образцов в аустенитном состоянии незначительно отличается для образцов диаметром 20 и 60 мм. Замедление скорости охлаждения в данном случае должно незначительно влиять на увеличение размера зерна аустенита. Уменьшение скорости охлаждения в интервале температур A_{r3} – A_{r1} при выделении феррита из аустенита, должно также способствовать росту зерна аустенита до того момента, пока не станет сплошной сетка выделившегося по границам зерен феррита [3]. Как показывают исследования, сетка феррита по границам зерен аустенита является более сплошной при быстром охлаждении (рис. 3, а). При медленном охлаждении, например, в случае охлаждения образца диаметром 60 мм (рис. 3, б), формируется более крупное зерно перлита и разорванная сетка феррита.

Скорость охлаждения образцов влияет на механические свойства стали (табл. 2). С уменьшением скорости охлаждения снижается предел прочности и текучести, что можно объяснить увеличением зерна перлита, свойства пластичности (δ , ψ) практически не изменяются.

В результате проведенных исследований установлены факторы, влияющие на размер зерна перлита, количество феррита и общую структуру нормализованной и отожженной стали 45. К ним относятся продолжительность нагрева металла выше A_{C3} и скорость его охлаждения до температуры начала изотермического превращения аустенита.

Таблица 2

Влияние диаметра образцов на механические свойства стали 45 после всестороннего равномерного охлаждения

Диаметр образцов, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Исходный*	381	643	25,8	49
20	368	643	27	48
30	372	639	28,3	47
40	364	633	27,7	47
50	351	626	29,3	47
60	336	594	30	49

* Образец диаметром 70 мм после отжига в заводских условиях.

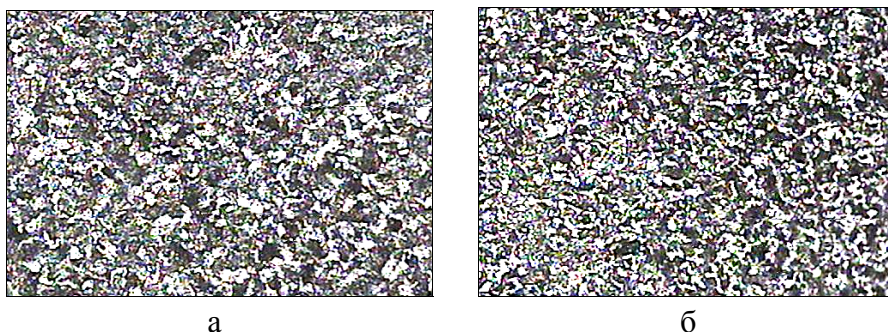


Рис. 3. Микроструктура стали 45 после различной скорости охлаждения а (max); б (min), $\times 100$

ВЫВОДЫ

Установлено, что медленное охлаждение в интервале температур $A_{C3} - Ar_3 - Ar_1$ способствует укрупнению зерна перлита после охлаждения. Повышение скорости охлаждения в интервале температур $A_{C3} - Ar_3 - Ar_1$ уменьшает долю феррита по границам зерен перлита из-за малой продолжительности времени для его выделения, однако улучшает равномерность его распределения.

Полученные данные показывают, что диаграмма изотермического превращения аустенита является генетической памятью структурно-фазовых превращений в стали при ее термической обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1988 – 647 с.
2. Delbart G. *Courbes de transformation des aciers de fabrication francaise* / G. Delbart, A. Constant. – Saint-Germain en Laye, 1954–1956.
3. Заблоцкий В. К. *Формирование аустенитной структуры при нагреве доэвтектоидной стали* / В. К. Заблоцкий, В. Е. Фельдман // *Вісник ДДМА : зб. наук. праць*. – Краматорськ, 2006. – № 2 (4). – С. 138–142.
4. Ghorbani Jafar *An investigation into the influence of microstructure on the toughness and tensile properties of V-microalloyed steels* / Jafar Ghorbani. – *Steel Grips*, 1965. – № 4. – P. 279–283.
5. *Самоотжиг стали 45* / В. К. Заблоцкий, В. И. Шимко, В. Е. Фельдман, А. И. Шимко // *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов*. – Днепропетровск : ПГАСА, 2010. – № 53. – С. 100–104.