

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Член-корреспондент АН СССР Г. В. КУРДЮМОВ и О. П. МАКСИМОВА

**О КИНЕТИКЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В МАРТЕНСИТ  
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Понимание мартенситного превращения как термического процесса образования зародышей и их роста привело к заключению, что большая скорость мартенситных превращений обуславливается малой энергией активации превращения<sup>(1)</sup>. В таком случае можно ожидать, что при переходе к достаточно низким температурам скорость протекания мартенситных превращений, в частности превращения аустенита в мартенсит, сделается измеримой. Этот вывод является неожиданным с точки зрения установившихся представлений о превращении аустенита в мартенсит, по которым оно должно протекать с большой скоростью при любых низких температурах. На основе большого экспериментального материала прочно утвердилось убеждение, что превращение аустенита в мартенсит не может быть задержано ни при каких доступных нам скоростях охлаждения, что положение мартенситной точки не зависит от скорости охлаждения, что аустенит нельзя переохладить ниже мартенситной точки<sup>(2,3)</sup>.

В связи с указанным выше выводом нами было произведено специальное исследование кинетики превращения аустенита в мартенсит при температурах ниже комнатной. Оказалось, что уже ниже  $-70^{\circ}$  скорость процесса становится измеримой, и во многих случаях при температуре жидкого азота становится близкой к нулю. Вследствие этого оказалось возможным путем быстрого охлаждения переохладить аустенит значительно ниже мартенситной точки и измерять скорость превращения в зависимости от температуры. В настоящей работе мы сообщаем результаты некоторых опытов, проведенных в этом направлении.

Кинетика изучалась магнитометрическим методом. Высокая чувствительность прибора позволяла замечать небольшие изменения в количестве мартенсита, порядка 0,1%.

На рис. 1 представлены результаты опыта, показывающего возможность задержки мартенситного превращения быстрым охлаждением. Образец стали с 6% Mn и 0,6% C был быстро охлажден до температуры жидкого азота ( $-194^{\circ}$ ) и при этой температуре полностью сохранил аустенитную структуру. После того как температура была повышена до  $-159^{\circ}$ , процесс мартенситного превращения сразу пошел (начавшись даже несколько ниже). Превращение протекало сначала с некоторой скоростью, сохранявшейся практически постоянной в течение довольно длительного промежутка времени; далее скорость стала убывать, однако даже через 3 часа процесс еще продолжался. Общий эффект превращения за 3 часа составил около 12% (последующий быстрый нагрев до  $+20^{\circ}$  дополнительного превращения не вызвал).

Столь низким температурам присущ именно указанный характер изменения скорости превращения: сохранение начальной скорости в течение длительного времени, медленное затухание процесса и распространение превращения на большой интервал времени. Дебаграммы образцов после такой обработки показали присутствие в них мартенсита в количестве примерно одинаковом по всему сечению образцов и соответствующем результатам магнитных определений (в некоторых образцах до 25%)<sup>\*</sup>.

В процессе ступенчатого охлаждения марганцовистой стали с 6% Мп изотермическое превращение было впервые обнаружено при температуре  $-84^{\circ}$  и продолжалось до температуры  $-170$ ,  $-180^{\circ}$ . Наибольший эффект изотермического превращения был получен в этой стали при

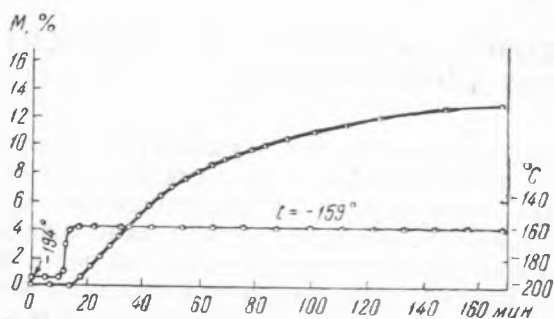


Рис. 1. Изотермическое превращение аустенита при температуре  $-159^{\circ}$  непосредственно после переохлаждения в жидком азоте. Сталь 0,6% С; 6% Мп

температуры остановки, имеет поэтому вид таммановской кривой. Суммарный эффект изотермического превращения, дающий итог всех температурных остановок, соответствует для рассматриваемого опыта около 20%.

Как изменяется скорость превращения во времени при различных температурах? На сводной диаграмме (рис. 2), дающей для рассматриваемого опыта приращение количества мартенсита на различных остановках, видно, что характер кривых изменяется вполне закономерно. На первых ступенях переохлаждения при наивысших температурных остановках процесс быстро затухает. Превращение быстро охватывает некоторое количество аустенита, и вскоре количество мартенсита доходит до некоторой предельной величины; за первые несколько минут выдержки превращается основное количество аустенита, способного вообще претер-

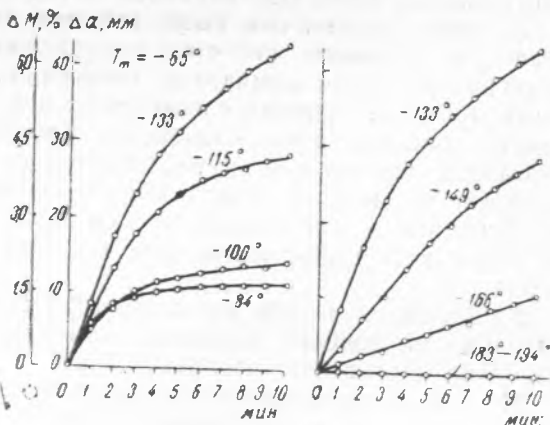


Рис. 2. Изотермическое превращение аустенита во время остановок при ступенчатом охлаждении. Сталь 0,6% С; 6% Мп

<sup>\*</sup> Предварительно с этих же образцов были сняты рентгенограммы после погружения в жидкий азот и последующего быстрого нагрева до комнатной температуры. При этом  $\alpha$ -фазы не было обнаружено.

левать превращение при данной температуре. При понижении температуры характер кривых существенно изменяется, затухание превращения происходит все более медленно. Начальная скорость сохраняется на больший промежуток времени. Так, при температуре  $-166^\circ$  скорость сохранялась постоянной по крайней мере в течение 10 мин. выдержки.

Опыты, неоднократно проведенные на различных образцах марганцовистой стали с различным содержанием углерода и марганца и на простой углеродистой стали, показали ту же закономерность протекания превращения во времени при различных температурах. Ступенчатый нагрев после резкого погружения в жидкий азот дал в общем

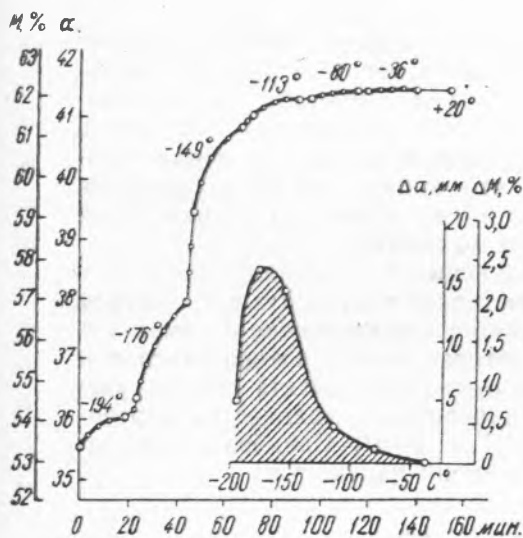


Рис. 3. Превращение аустенита при ступенчатом нагреве после переохлаждения в жидком азоте. Сталь 1,6% С ( $\alpha$  — в см)

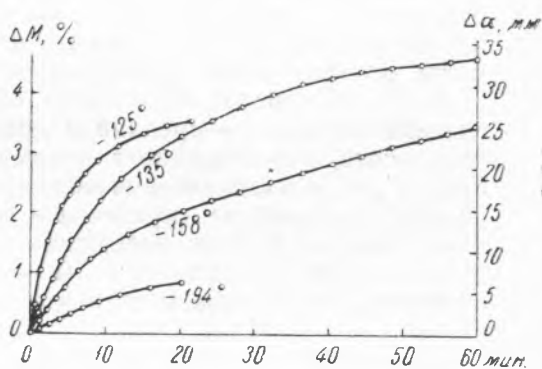


Рис. 4. Изотермическое превращение аустенита в мартенсит при различных температурах. Сталь 1,6% С

ту же картину изменения скорости; при этом были получены и аналогичные кривые приращения количества мартенсита в зависимости от температуры (с максимумом).

На простой углеродистой стали с 1,6% С, имеющей после резкой закалки в щелочной ледяной воде около 80% аустенита, также показана возможность задержки мартенситного превращения путем ускоренного охлаждения и возобновления процесса при последующем нагреве. Получен также и эффект изотермического мартенситного превращения. Суммарный эффект мартенситного превращения, полученный при нагреве после резкого погружения в жидкий азот, составляет здесь около 10%, что отвечает смещению светового зайчика на первичной фотографии на 60 мм (рис. 3).

Опыты, проведенные с углеродистой сталью, показали, что изотермическое превращение впервые начинается именно в той области температур, в которой, согласно кривой непрерывного охлаждения, наступает сильное замедление превращения (около  $-100^\circ$ ). Остановки во время охлаждения при температуре выше  $-70^\circ$  приводят к быстрому прекращению превращения после установления температуры выдержки. Предельное количество мартенсита достигается здесь почти сразу, что указывает на большую скорость превращения. Выдержка при  $-80^\circ$ ,  $-100^\circ$  дает уже небольшой эффект, причем процесс быстро затухает. Остановки при более низких температурах дают уже значитель-

ный эффект и показывают длительный процесс, затухающий тем медленнее, чем ниже температура.

В некоторых опытах охлаждение велось сразу до температур в области  $-120$ — $-160^\circ$ , после чего снималась кривая изотермического превращения. Характер процесса при разных температурах показан на рис. 4.

Следует отметить, что при получении кривых мартенситного превращения при непрерывном охлаждении различными исследователями всегда отмечалось прекращение процесса при температурах в области  $-100^\circ$ . Полученные нами данные показывают, что это обусловлено малой скоростью превращения ниже указанной температуры. При достаточной выдержке, даже при такой температуре, как  $-160^\circ$ , количество мартенсита может быть значительно увеличено.

При выяснении вопроса о зависимости скорости превращения от температуры необходимо учитывать тот факт, что при каждой температуре превращается только часть всего объема аустенита, увеличивающаяся с понижением температуры. Кроме того, необходимо принимать во внимание количество аустенита, превратившегося до начала изотермической выдержки. Это значит, что количество образующегося мартенсита мы должны относить не ко всему объему, а только к той части, которая может превратиться при выдержке.

Пусть  $n$  — число зародышей, образующихся в единицу времени в единице объема,  $v$  — средний объем кристаллов мартенсита и  $V$  — объем мартенсита, образовавшийся при изотермической выдержке к моменту  $t$ . Если  $V'_0$  — та часть объема образца, которая может превратиться при данной температуре (предельное количество мартенсита минус уже имеющееся к началу выдержки), то приращение количества мартенсита за время  $dt$  выразится:  $dV = nv(V'_0 - V)dt$ . Следовательно, зависимость количества мартенсита от времени напишется:

$$1 - \frac{V}{V'_0} = 1 - p' = e^{-nvt}$$

Экспериментальные кривые удовлетворяют такой зависимости, по крайней мере на участке до „полупревращения“. Отсюда следует, что число зародышей, по крайней мере в начальных стадиях превращения, остается постоянным при данной температуре. Это число зародышей пропорционально тогда скорости превращения в начальный момент  $(\dot{a}p' / dt)_{t=0}$ . Последняя величина может быть получена непосредственно из наших кривых, если процент изотермически превращенного аустенита относить не ко всему объему, а только к указанной выше части.

Таким способом были определены значения скоростей превращения при различных температурах для стали с 6% Mn. Зависимость логарифма скорости от  $1/T$  оказалась прямолинейной, что находится в соответствии с пропорциональностью скорости образования зародышей величине  $e^{-U_1/kT}$ , где  $U_1$  — энергия активации. Эти данные позволили оценить энергию активации образования зародышей мартенсита, которая оказалась равной 1600 кал. на моль, т. е. 0,07 eV.

Институт металлофизики  
ЦНИИчермет

Поступило  
19 IV 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Г. В. Курдюмов. ДАН, 60, № 9 (1948). <sup>2</sup> С. С. Штейнберг, Металлург, № 9 — 10, 58 (1937); Термическая обработка стали, Металлургиздат, 1946. <sup>3</sup> А. П. Гуляев, Ю. М. Лохтин и А. И. Тарусин, Термическая обработка стали, Машгиз, 1946.