

Изменение физических свойств легированных сталей при развитии высокотемпературной обратимой отпускной хрупкости

Описана роль выделения карбидных частиц при развитии обратимой отпускной хрупкости. Исследованы корреляционные зависимости между твёрдостью, коэрцитивной силой и характеристиками ударного изгиба сталей с различной склонностью к охрупчиванию.

Ключевые слова: легированная сталь, выделение карбидных частиц, корреляционная зависимость, обратимая отпускная хрупкость

Введение. В настоящей работе приведены данные, показывающие, что развитие обратимой отпускной хрупкости сопровождается изменением физических свойств. Эти изменения свидетельствуют о распаде α -твёрдого раствора, что, в свою очередь, и обуславливает снижение ударной вязкости стали.

Экспериментальный материал, методика термической обработки и методы исследования. Исследование проводилось на сталях с одинаковым содержанием углерода (0,75-0,77 %), легированных марганцем, кремнием, ванадием, хромом и никелем (табл. 1).

Слитки опытных сталей проковывались на прутки, из которых изготавливали заготовки размером 10,5×10,5×55,0 мм, которые подвергали термической

обработке: нормализации, закалке, высокотемпературному отпуску при 650 °С (выдержка 2 ч) по двойному циклу с исключением влияния посторонних факторов, кроме наличия или отсутствия обратимой отпускной хрупкости [1].

Перед отпуском заготовки образцов подвергали нормализации и закалке по режимам, приведённым в табл. 2.

Закалённые заготовки образцов подвергались высокотемпературному отпуску при температуре 650 °С с последующей обработкой по двойному циклу; вязкое состояние достигалось путём охлаждения заготовок в масле, нагретом до 250-300 °С, что гарантировало отсутствие напряжений в заготовках.

Таблица 1

Химический состав сталей, выплавленных в электропечи

Условный номер плавки	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	S	P
1	0,77	0,25	1,74	0,16	–	–	0,024	0,006
2	0,76	1,7	0,78	0,11	–	–	0,03	0,02
3	0,76	0,26	0,71	0,10	–	–	0,03	0,025
4	0,77	0,27	0,74	0,14	0,19	–	0,03	0,022
5	0,75	0,25	0,78	1,76	–	–	0,025	0,027
6	0,75	0,27	0,78	0,12	–	1,86	0,025	0,025

Таблица 2

Режимы нормализации и закалки

Условный номер плавки	Нормализация с выдержкой 1 час		Закалка с выдержкой 30 мин			
	температура, °С	балл действительного зерна	температура, °С	охлаждающая среда*	структура	HRc
1	830	6-7	830	масло	мартенсит	60
2	900	7-8	900			58
3	760		760	вода-масло		62
4	900	6-7	900			59
5	930	7	930	серная кислота		58
6	800	7-6	800	масло		61

Для снятия напряжений заготовки после закалки проходили отпуск при 80-100 °С

На готовых ударных образцах Менаже измерялись коэрцитивная сила, удельное электросопротивление на заготовках 10×10 мм без надреза и твёрдость. Все результаты исследований этих свойств обрабатывались статистическим методом по известной методике К. А. Браунли.

Измерение коэрцитивной силы производилось баллистическим методом на коэрцитиметре системы Н. В. Радченко. Относительная ошибка измерения определялась по формуле: $\Delta H_c / H_c = (\Delta i / i) \cdot 100 \%$, где Δi – абсолютная ошибка при определении тока размагничивания, A ; i – минимальное значение тока размагничивания, A . Относительная ошибка определения коэрцитивной силы для образцов плавки 1-4; 6 – 1,8 %, а для образцов плавки 5 – 2,2 %. Измерение электросопротивления образцов плавки 1; 3-6 осуществлялось на двойном мосте Томпсона типа МТ-5, а для образцов плавки 2 – на одинарном мосте типа Р-329. Относительная ошибка измерения удельного электросопротивления определялась по формуле:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot 100\% = \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta a}{a} + \frac{\Delta \ell}{\ell} = 1,4 \%,$$

где $\Delta R = 0,05 \cdot 10^{-5}$ – точность отсчёта электросопротивления, Ом; $R = 5,8 \cdot 10^{-5}$ – минимальная величина электросопротивления, Ом; $\Delta a = 0,01$ – точность измерения сечения образца, мм; $a = 9,8$ – минимальная величина сечения образца, мм; $\Delta \ell = 0,1$ – точность измерения рабочей длины, мм; $\ell = 30,5$ – расстояние между контактными точками, мм.

Твёрдость определялась на приборе Бринелля при нагрузке 750 кг и диаметре шарика 5 мм. В надежде зафиксировать упрочнение стали в хрупком состоянии производилось определение коэффициента упрочнения – « n » по формуле Buckle H. ($n = \lg(P_1/P_2) / \lg(d_1/d_2)$), где P – нагрузка, d – диаметр отпечатка).

В этом случае твёрдость определялась шариком диаметром 10 мм при нагрузках 1000 и 3000 кг. Относительная ошибка измерения твёрдости составляла 1,2 % (по методике М. Е. Блантера).

С целью определения изменения объёма при охрупчивании из образцов Менаже плавки 2 и 5 (сталь этих плавки наиболее подвержена охрупчиванию) были изготовлены дилатометрические образцы. Исследование проводилось на дифференциальном дилатометре в интервале температур 20-700 °С по схемам: пирок-хрупкий образец; пирок-вязкий образец; хрупкий образец-вязкий образец).

Склонность к отпускной хрупкости определялась по методике А. Р. Taber, J. F. Jhorlin «среднего температурного сдвига» с фиксацией на кривых хладноломкости точек хрупкого и вязкого изломов (по 20 %). Металлографическое исследование хрупких и вязких образцов осуществлялось после травления в реактивах насыщенного эфирно-водного раствора пикриновой кислоты и насыщенного водного раствора пикриновой кислоты по методике J. В. Cohen, Hurlich H. Jacobson.

Результаты экспериментального исследования и их обсуждение.

Изменение физических свойств при развитии обратимой отпускной хрупкости.

Коэрцитивная сила. В таблице 3 приведены результаты определения коэрцитивной силы хрупких и вязких образцов стали плавки 1, 3-6. Данные по стали плавки 2 не приводятся вследствие большого разброса значений коэрцитивной силы для образцов в одном и том же состоянии. Как было установлено, такой разброс значений связан с высокой неравномерностью величины аустенитного зерна, по-видимому, из-за ликвации кремния.

Таблица 3

Коэрцитивная сила в вязком и охрупченном состояниях

Условный номер плавки	Коэрцитивная сила, Э	
	вязкое состояние	хрупкое состояние
1	13,98	15,34
3	13,65	14,29
4	14,70	15,93
5	23,71	23,93
6	11,80	12,80

Как видно, у стали всех плавки развитие охрупчивания сопровождается ростом коэрцитивной силы. Причём данные по плавке 5 дают незначительное различие по коэрцитивной силе в вязком и хрупком состояниях.

Для того чтобы установить, значимо ли это различие, а также значимо ли различие значений коэрцитивной силы плавки 2 (в вязком – $H_c = 12,04$ Э, в хрупком – $H_c = 12,9$ Э) при большом рассеивании частных значений была проведена оценка значимости разницы средних значений коэрцитивной силы по известной методике К. А. Браунли. Выполненный анализ показал, что отмеченное различие в значениях коэрцитивной силы между вязкими и хрупкими образцами плавки 5 с увеличением числа замеров в четыре раза становится значимой величиной. Анализ по плавке 2 показал, что со значимостью в 99,9 % можно утверждать, что среднее значение коэрцитивной силы для хрупких образцов больше, чем средние значения коэрцитивной силы для вязких образцов.

Для образцов плавки 1, 3, 4, 6 такого анализа не проводилось, так как характер частотных кривых говорит о чётком различии средних значений коэрцитивной силы вязких и хрупких образцов.

Учитывая, что применённая методика термической обработки приводит к исключению влияния остаточных напряжений, можно считать, что повышение коэрцитивной силы связано с наличием выделений новой фазы определённой степени дисперсности в хрупком состоянии.

Удельное электросопротивление. В таблице 4 представлены результаты определения удельного электросопротивления для образцов плавки 1-6.

Как видно характер изменения удельного электросопротивления у всех плавки аналогичен. Во всех

Таблица 4

Удельное электросопротивление в вязком и хрупком состояниях

Условный номер плавков	Удельное электросопротивление, $\rho \times 10^5$ Ом·см	
	вязкое состояние	хрупкое состояние
1	2,386	2,348
2	3,910	3,900
3	2,031	1,995
4	2,073	2,047
5	2,420	2,370
6	2,495	2,448

случаях в вязком состоянии удельное электросопротивление выше, чем в хрупком состоянии. Это свидетельствует о распаде пересыщенного твёрдого раствора при развитии охрупчивания.

Для плавков 4 и 2, в которых разность средних значений удельного электросопротивления образцов в вязком и хрупком состояниях лежит в пределах ошибки опыта, была оценена значимость разницы средних значений. Расчёты показали, что со степенью вероятности в 95 % (плавка 4) и 98 % (плавка 2) можно утверждать, что удельное электросопротивление в вязком состоянии выше, чем в хрупком состоянии.

Твёрдость. В таблице 5 представлены данные по измерению твёрдости образцов плавков 1-6.

Как видно, во всех плавках хрупкое состояние, по сравнению с вязким, отличается более высокой твёрдостью, то есть в этом случае развиваются процессы дисперсионного твердения.

Для подтверждения достоверности этого наблюдения во всех случаях была выполнена оценка значимости разницы средних значений твёрдости в хрупком и вязком состояниях.

Таблица 5

Диаметр отпечатка при измерении твёрдости

Условный номер плавков	Диаметр отпечатка, мм	
	вязкое состояние	хрупкое состояние
1	1,910	1,860
2	1,900	1,895
3	1,920	1,960
4	1,830	1,810
5	1,720	1,715
6	1,931	1,925

Коэффициент упрочнения – «п»*

Условный номер плавков	Диаметр отпечатка при нагрузке 1000 кг, мм		Диаметр отпечатка при нагрузке 3000 кг, мм		Коэффициент упрочнения – «п»	
	вязкое состояние	хрупкое состояние	вязкое состояние	хрупкое состояние	вязкое состояние	хрупкое состояние
1	2,290	2,270	3,870	3,77	2,09	2,17
2	2,354	2,322	3,906	3,84	2,17	2,20
3	2,390	2,390	4,020	4,03	2,11	2,11
4	2,190	2,154	3,720	3,63	2,07	2,10
5	2,060	2,020	3,410	3,38	2,14	2,18
6	2,370	2,360	3,980	3,94	2,11	2,15

* В таблице приведена средняя величина диаметра отпечатка из пяти замеров

Расчёты показали, что в плавках 1 и 4 с вероятностью в 95 % твёрдость в хрупких образцах выше, чем в вязких; в остальных плавках это можно утверждать при данном числе наблюдений с вероятностью в 90 %.

Для подтверждения реальности дисперсионного упрочнения в хрупком состоянии в табл. 6 приведены данные по изменению коэффициента упрочнения – «п».

Из данных табл. 6 видно, что коэффициент «п» в хрупких образцах плавков 1, 2, 4-6 выше, чем в вязких. И лишь для плавки 3 не наблюдается различие в этом коэффициенте между хрупким и вязким состояниями, что объясняется низкой склонностью этой стали к хрупкости ($\Delta t = 8$ °С – см. данные табл. 5).

Изменение объёма при нагреве. Исследование показало, что в вязком и хрупком состояниях (плавка 5) при нагреве до 560 °С начинаются процессы, препятствующие расширению образцов, связанные, по-видимому, с коагуляцией карбидов. Однако при тщательном изучении дилатограмм можно установить, что в случае вязкого образца наклон кривой дилатограммы после нагрева выше 560 °С более крутой, чем наклон кривой у хрупкого образца. Из этого следует – вязкий образец испытывает при температуре более 560 °С меньшее изменение объёма, чем хрупкий образец. Это наблюдение было подтверждено при испытании пары вязкого и хрупкого образцов: наблюдалось меньшее изменение объёма при нагреве вязкого образца выше 560 °С. Подобные же результаты получены при исследовании образцов плавки 2, с тем лишь отличием, что уменьшение изменения объёма вязкого образца по отношению к хрупкому наблюдалось после нагрева выше 540 °С.

Наблюдаемое явление объясняется, с нашей точки зрения, охрупчиванием вязкого образца при нагреве из-за распада пересыщенного α -твёрдого раствора.

Металлографическое исследование отпускной хрупкости. Травление вязких и хрупких образцов проводилось в двух специальных реактивах: насыщенный эфирно-водный раствор пикриновой кислоты; насыщенный водный раствор пикриновой кислоты.

Было установлено, что более стабильно и отчётливо работает реактив по первой позиции. С его использованием и выполнено исследование. Хрупкие образцы всех исследованных плавков стали показывать чёткое травление границ зёрен. Величина зерна, определённая по сетке травления, соответствует величине зерна, определённой в закаленном

Таблица 6

состоянии, то есть травление происходило по границам бывшего аустенитного зерна.

Степень травления границ зёрен сталей разных плавок была различной. При этом наблюдалась связь между степенью травления и склонностью к отпускной хрупкости. В стали плавки 5, наиболее склонной к охрупчиванию, травление границ зёрен было интенсивным, чётким и непрерывным. По мере уменьшения склонности к охрупчиванию, травление границ зёрен становилось менее чётким и терялась непрерывность. Для сталей плавок 6, 4 и особенно плавки 3 травление границ зёрен наблюдалось в виде разорванных отдельных цепочек. В вязком состоянии травление границ зёрен не наблюдалось. Анализируя эти результаты, можно предположить следующее.

Если при охрупчивании происходит выделение фазы (на что указывает изменение физических свойств), то в сталях, наиболее склонных к отпускной хрупкости, таких выделений больше и они находятся в более мелкодисперсной форме; и такими выделениями, скорее всего, являются карбиды, что подтверждается данными работ Aborn P. H., Fast G. D., в которых установлено воздействие пикриновой кислоты на соединения углерода.

Ударные испытания. Склонность легированных сталей к отпускной хрупкости. При проведении ударных испытаний, кроме «среднего температурного сдвига», определялись также критические температуры хладноломкости, которые соответствовали температурам испытания, при которых в изломе появляются первые признаки хрупкого разрушения.

Из табл. 7 видим, что исследуемый материал обеспечивает широкий набор по степени охрупчивания ($\Delta t = (+8 \text{ }^\circ\text{C}) \div (+120 \text{ }^\circ\text{C})$), что в сравнительном анализе изменения физических свойств даёт ценный материал для понимания природы обратимой отпускной хрупкости.

Таблица 7

Результаты ударных испытаний

Условный номер плавки	Критическая температура хрупкости, $^\circ\text{C}$		Средний температурный сдвиг, $^\circ\text{C}$
	вязкое состояние	хрупкое состояние	
1	+15	(+30) \div (+40)	34
2	(+15) \div (+30)	+80	83
3	+25	+30	8
4	+50	+70	20
5	+80	+190	120
6	+30	+40	28

О процессах, лежащих в основе обратимой отпускной хрупкости. Материалы, приведённые в разделе «Результаты экспериментального исследования и их обсуждение», подтверждают определяющую роль выделений новых фаз, по-видимому карбидов, в развитии процессов обратимой отпускной хрупкости. Рассмотрим это утверждение более конкретно.

Современные представления о связи структуры стали и коэрцитивной силы, изложенные в работах Либша Д., Конрада Г., Дийкстра Л. Д. сводятся к рассмотрению двух факторов: количества и размера вы-

делений и наличия напряжений в отдельных областях. Коэрцитивная сила железа выражается уравнением:

$$H_c = K_1 V_1 + K_2 V_2, \quad (1)$$

где K_1 и K_2 – константы, зависящие от структурно-нечувствительных магнитных свойств – магнитного насыщения и константы магнитной анизотропии; V_1 – часть объёма, занятого включениями; V_2 – часть объёма, где локализованы внутренние напряжения.

В нашей работе специальная термическая обработка гарантировала отсутствие напряжений при получении вязкого состояния.

Поэтому тот факт, что в хрупком состоянии коэрцитивная сила выше, чем в вязком, свидетельствует о наличии выделений новых фаз в хрупком состоянии. Об этом же говорят данные по изменению электросопротивления, твёрдости и объёма вязких образцов при их нагреве в область критических температур хрупкости. Однако в литературе имеются высказывания (Меськина В. С., Деле В. А.), что процесс выделения новых фаз не отвечает за обратимую отпускную хрупкость и является сопутствующим, второстепенным процессом.

Для того чтобы установить, связано ли охрупчивание непосредственно с выделениями или процесс выделения фаз является лишь сопутствующим, мы выполнили проверку наличия связи между изменением физических свойств и степенью охрупчивания методом математической статистики.

На рис. 1 и 2 представлены изменение коэрцитивной силы и электросопротивления от степени охрупчивания. На этих же рисунках представлены данные, полученные на легированных сталях иных (чем в данной работе) составов. Участки кривых, лежащих в зоне степеней охрупчивания более $34 \text{ }^\circ\text{C}$, из-за ограниченных данных методом математической статистики не обрабатывались и нанесены пунктиром.

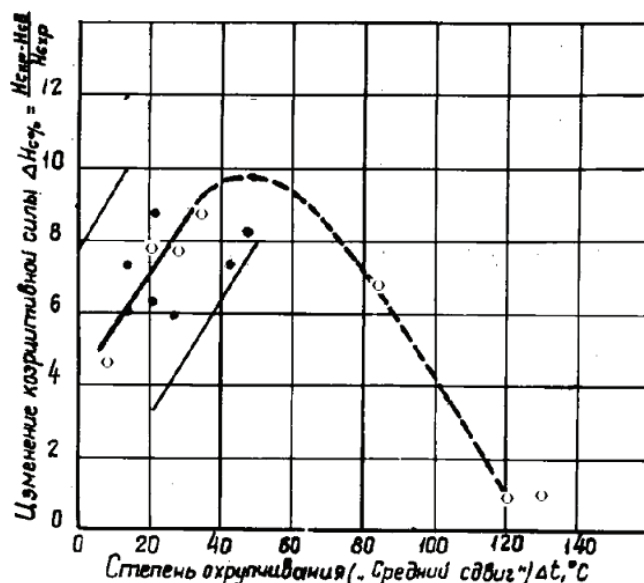


Рис. 1. Связь между изменением коэрцитивной силы и степенью охрупчивания (• – данные по легированным сталям иных составов)

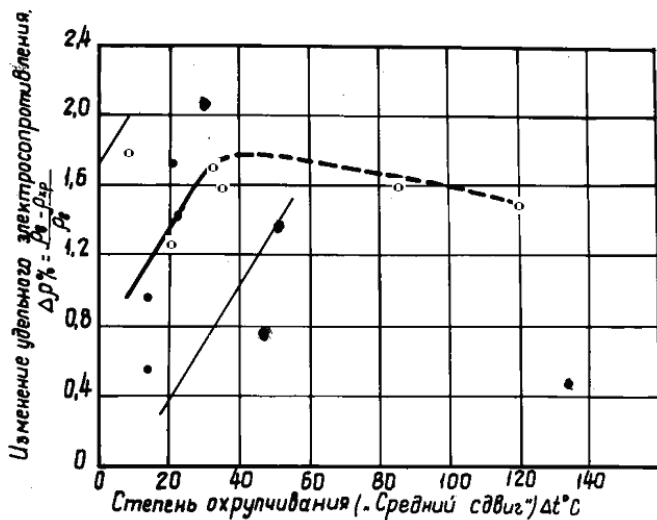


Рис. 2. Изменение удельного электросопротивления от степени охрупчивания (• – данные по легированным сталям иных составов)

Как видно из этих рисунков, при степени охрупчивания от 8 до 34 °С наблюдается прямолинейная зависимость между средним температурным сдвигом и изменением коэрцитивной силы и электросопротивлением, %:

$$\Delta H_c = 4,2 + 0,148 \Delta t \quad (2)$$

коэффициент корреляции равен 0,845 (вероятность связи $\rho = 99\%$);

$$\Delta \rho = 0,77 + 0,031 \Delta t, \quad (3)$$

коэффициент корреляции равен 0,8 (вероятность связи $\rho = 98\%$).

Ход кривых этих рисунков свидетельствует о том, что охрупчивание в пределах 8–34 °С связано с ростом количества выделяющейся фазы, а дальнейшее охрупчивание происходит только за счёт уменьшения размеров выделяющихся частиц, так как известно, что коэрцитивная сила зависит от размера частиц по экстремальной зависимости, подобной рис. 1 и 2.

О роли дисперсности выделяющихся частиц свидетельствуют данные по изменению твёрдости от степени охрупчивания (рис. 3). Стали, в значительной степени склонные к охрупчиванию, практически не дают повышения твёрдости в хрупком состоянии. Эти данные, в свете известных положений о зависимости коэрцитивной силы от размера выделяющихся

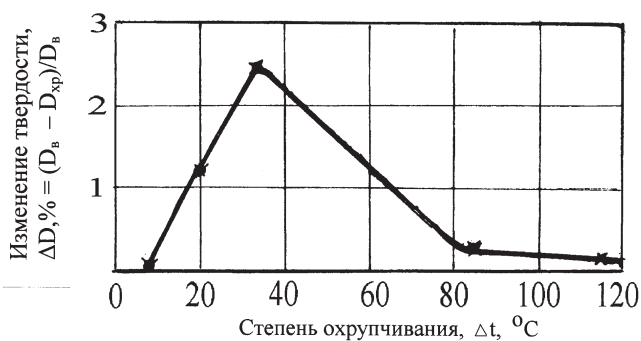


Рис. 3. Изменение твёрдости в зависимости от степени охрупчивания

частиц, могут свидетельствовать о том, что в этом случае частицы выделяются в очень мелкодисперсной форме.

Сильное растравливание границ зёрен в сталях, в значительной степени склонных к отпускной хрупкости, также свидетельствует, по нашему мнению, о наличии мелкодисперсных выделений по границам зёрен, обогащённых на границах выделение-матрица атомами поверхностно-активных элементов, прежде всего фосфором. В результате исследований Полякова С. Н., Казакова С. С., Молчанова В. А., Гладковой Т. А. было установлено, что лишь ликвидация фосфора не может быть причиной охрупчивания. Ясно, что выделение новой фазы происходит лишь в результате распада пересыщенного α -твёрдого раствора.

В данной работе сделана попытка установить, является ли причиной пересыщения α -твёрдого раствора углерод и если да, то в каком количестве.

Для ответа на этот вопрос были сопоставлены данные результатов измерения удельного электросопротивления с данными Питча и Люкке (рис. 4).

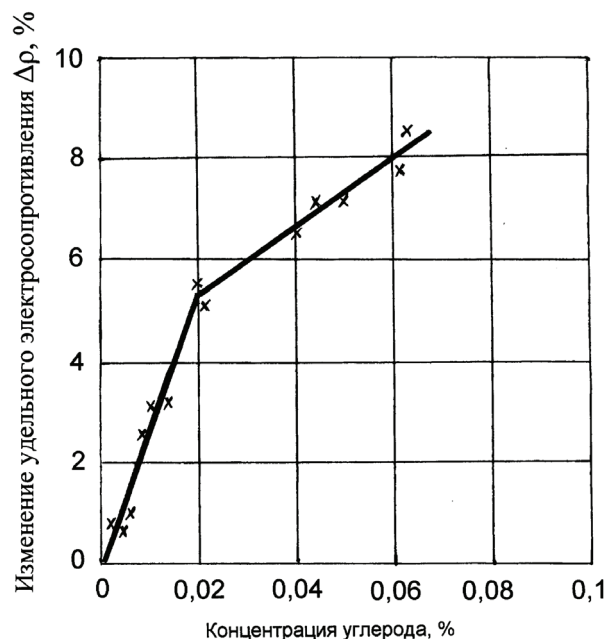


Рис. 4. Зависимость прироста удельного электросопротивления $\Delta\rho$ от концентрации углерода (Брук Б. И.)

В нашем случае наименьшее изменение удельного электросопротивления при охрупчивании имела сталь, легированная ванадием: $\Delta\rho = 1,25\%$, а наибольшее – сталь, легированная никелем: $\Delta\rho = 1,89\%$. Электросопротивление гетерогенной смеси феррита и цементита может быть определено по формуле, приведённой в работах Лифшица Б. Г.:

$$\rho = P_1\rho_1 + P_2\rho_2, \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 – электросопротивление компонентов; P_1 и P_2 – весовые концентрации этих компонентов.

Для стали с содержанием 0,75 % С и 89 % Fe_2O_3 формула (4) принимает вид:

$$\rho = 0,89\rho_{\phi} + 0,11\rho_{\psi}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{ф}}$, $\rho_{\text{ц}}$ – электросопротивление феррита и цемента.

Из справочных данных известно, что удельное электросопротивление стали с 0,8 % С составляет 0,15 Ом мм²/м, а для феррита – около 0,1. Тогда по формуле (5): $0,88 \rho_{\text{ф}} + 0,12 \rho_{\text{ц}} = 0,15$ Ом мм²/м и $\rho_{\text{ц}} = 0,51$ Ом мм²/м.

Из уравнения (5) следует, что доля, которую вносит феррит в общее сопротивление стали с 0,75 % С, составит 62 %. Поэтому изменения в общем электросопротивлении стали с 0,75 % С от 1,25 до 1,89 % соответствуют изменениям в электросопротивлении феррита от 2 до 3 %. Согласно графику (рис. 4) такие изменения соответствуют уходу из α -раствора от 0,08 до 0,011 % С, то есть того количества углерода, который может выделяться из-за снижения растворимости между температурами 650 и 20 °С.

Поэтому можно считать установленным, что изменение электросопротивления при охрупчивании связано с выделением из α -раствора углерода вследствие переменной растворимости. Можно полагать, что выделяющиеся соединения углерода, располагаясь по границам зёрен и блоков феррита, приводят к снижению уровня ударной вязкости стали.

О размерах частиц новой фазы, выделяющейся при охрупчивании.

Расчёт возможной величины выделяющихся частиц новой фазы выполнен для участка кривой рис. 4 при $\Delta t > 34$ °С. По данным Кэ Тип-Суй при содержании в феррите углерода 0,026 % и при величине зерна 40-50 мкм ширина границ зерен равна 1000 ангстрем. Для такой ширины границ по данным этой же работы атомная концентрация углерода на границах зёрен равна 0,33 или 0,07 % объёмной концентрации.

Согласно данным Нель Л., коэрцитивная сила связана с размером частиц уравнением: $H_c - (4,73 \cdot 10^7 \rho + 0,99 \cdot 10^{19} \rho^3) \cdot \alpha^{2/3}$, где α – объёмная концентрация выделяющихся частиц; ρ – радиус частиц в мкм или ангстремах.

Определялась величина выделяющихся частиц при охрупчивании стали плавок 1 и 5.

Плавка 1. Величина коэрцитивной силы, обусловленная выделением частиц, эрстед:

$$\Delta H_c = H_{c \text{ хр.}} - H_{c \text{ вяз.}} = 15,338 - 13,977 = 1,361.$$

$$\text{Отношение } \frac{\Delta H_c}{\alpha^{2/3}} = \frac{1,361}{0,07^{2/3}} = 3,7$$

При отношении $\frac{\Delta H_c}{\alpha^{2/3}} = 3,7$ и $\alpha = 0,07$ диаметр вы-

деляющихся частиц согласно данным Нель Л.(рис. 4) будет равен 0,012 мкм или 120 ангстрем.

Плавка 5. Величина коэрцитивной силы, обусловленная выделением частиц, эрстед:

$$\Delta H_c = H_{c \text{ хр.}} - H_{c \text{ вяз.}} = 23,932 - 23,710 = 0,22$$

$$\text{Отношение } \frac{\Delta H_c}{\alpha^{2/3}} = \frac{0,22}{0,07^{2/3}} = 0,6.$$

Такой величине соответствует диаметр частиц фазы в 0,003 мкм или 30 ангстрем (рис. 5). Таким образом показано, что увеличение степени охрупчива-

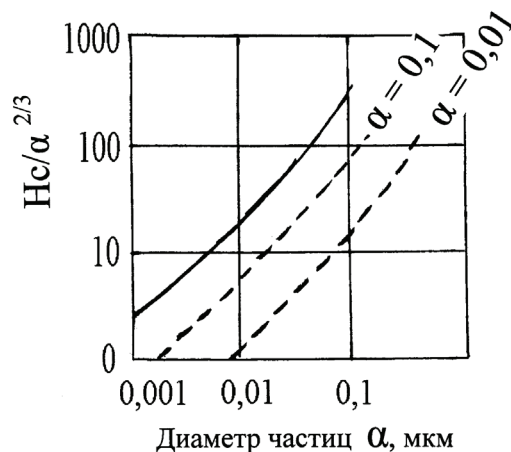


Рис. 5. Коэрцитивная сила в зависимости от диаметра включений (по данным Нель Л.)

ния после $\Delta t = 34$ °С связано с измельчением выделяющихся частиц карбидов. Степень их дисперсности мала, что и объясняет, по-видимому, неудачу попыток их определения электронно-микроскопическим методом.

Выводы

Установлено, что охрупчивание по механизму обратимой отпускной хрупкости приводит к росту коэрцитивной силы и твёрдости и к снижению удельного электросопротивления. Это свидетельствует о выделении при охрупчивании частиц карбидов.

Методом математической статистики показано, что процесс выделения карбидов из пересыщенного α -раствора является не сопутствующим, а ответственным за охрупчивание стали по механизму обратимой отпускной хрупкости.

Расчёт величины выделяющихся при охрупчивании карбидов, в значительной степени склонных к хрупкости сталей, показал, что их величина находится в пределах от 30 до 120 ангстрем.

Анотація*Поляков С. М., Верболоз В. Д.***Змінення фізичних властивостей легованих сталей при розвитку високотемпературної оборотної відпускнуї крихкості**

Описано роль виділення карбідних часток при розвитку оборотної відпускнуї крихкості. досліджені кореляційні залежності між твердінням, коерцитивною силою та характеристиками ударного вигину сталей з різною схильністю до окрихчування.

Ключові слова*легована сталь, виділення карбідних часток, кореляційна залежність, оборотна відпускна крихкість***Summary***Polyakov S., Verboloz V.***Changing the physical properties of alloy steels during the development of high temper brittleness**

This paper discussed the role of the secretion of carbide particles during the development of reversible temper brittleness. It characterized the correlation between hardness, coercive force and the impact bending properties of steels with different inclination to embrittlement.

Keywords*alloy steel, secretion of carbide particles, correlation, reversible temper brittleness*

Поступила 13.07.2015

**Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу
Вашей продукции или рекламный материал
о Вашем предприятии**

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнах с учётом налога на рекламу)**

2, 3 страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400	цветная	1050
чёрно-белая	700	чёрно-белая	500
1/2 страницы формата А4		1/2 страницы формата А4	
цветная	900	цветная	800
чёрно-белая	500	чёрно-белая	450
1/4 страницы формата А4		1/4 страницы формата А4	
цветная	550	цветная	300
чёрно-белая	300	чёрно-белая	200

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %