

Академик АН УССР В. И. АРХАРОВ, Т. Е. КОНСТАНТИНОВА

О ПРИЧИНАХ ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОГО ОТПУСКА

Согласно многочисленным исследованиям, обратимая отпускная хрупкость сплавов заключается в обогащении межкристаллитных границ малыми примесями таких элементов, как Sb, P, Sn, As (¹⁻⁶). Однако многие вопросы, связанные с этим явлением, все еще не решены. Среди них вопрос о температуре, при которой происходит это обогащение, о причинах обратимости явления и уменьшения склонности стали к охрупчиванию при длительных отпусках, о связи охрупчивания с процессом карбидообразования при отпуске и др.

Результаты, полученные при исследовании методами электронной фрактографии, микродифракции и микрорентгеноспектрального анализа стали, склонной к обратимой отпускной хрупкости, позволяют разрешить некоторые из этих вопросов.

Исследовалась сталь 35ХГСА. Термообработка образцов заключалась в выдержке при температуре 900° С в течение 3 час. с закалкой в масле и последующем отпуске. Охрупченное состояние получали путем отпуска при 525° (1 час) с охлаждением в воде или отпуском при 650° (1 час) и охлаждением с печью. Охлаждение в воде после отпуска 650° (1 час) приводило к неохрупченному состоянию. Ударные испытания проводились при комнатной температуре.

В работах (⁷⁻⁹) было показано, что наиболее сильное адсорбционное обогащение межкристаллитных зон малой примесью должно происходить при температуре максимальной растворимости этой примеси в сплаве. Такая температура для Sb, P, Sn, As в стали близка к обычно применяемым температурам нагрева под закалку. Закалка от температуры максимальной растворимости фиксирует обогащенное состояние межкристаллитных зон, и твердый раствор в них становится перенасыщенным.

Последующий отпуск должен приводить к локальному распаду твердого раствора в межкристаллитных зонах. В случае стали при отпуске происходит распад твердого раствора, пересыщенного по углероду с выделением карбидных включений.

Нами была предпринята попытка провести микрорентгеноспектральный анализ межкристаллитных зон с помощью электронного зонда MS-46 «Самеса». Травление шлифов с помощью электролита Поповой позволяло получать границы в виде выступов. Оказалось, что в межкристаллитных сочленениях закаленных образцов имеется повышенная концентрация фосфора. Это обогащение сохраняется после отпуска как в охрупченном, так и в неохрупченном состоянии.

Электронная фрактография с помощью метода экстрагирующих реплик показала, что на межкристаллитных поверхностях разрушения охрупченных образцов (отпуск 525°, 1 час) наблюдается большое количество мелкодисперсных пластинчатых выделений (рис 1а), а на поверхности изломов неохрупченных образцов имеются более крупные, округленные включения (рис. 1б).

Методом микродифракции, при ускоряющем напряжении 200 кВ, установлено, что и те и другие выделения имеют решетку цементита. Микрорентгеноспектральный анализ реплик с экстрагированными включениями

показал присутствие в них наряду с железом хрома, марганца и фосфора. С повышением температуры отпуска от 525 до 650°, по данным микроанализа, происходит обогащение частиц выделений карбидной фазы хромом и марганцем, а количество фосфора в них уменьшается. После 100-часовой выдержки при 650° фосфор в карбидах вообще не обнаруживается.

По данным работ (¹⁰, ¹¹), карбиды, выделяющиеся на первом этапе отпуска, имеют такую же концентрацию примесных элементов, что и исходный твердый раствор. Следовательно, цементит, образовавшийся в обогащенных фосфором межкristаллитных зонах, имеет повышенное содержание фосфора, что и обнаруживается микроанализом.

Но некарбидообразующие элементы стремятся перейти из цементитных выделений в окружающий твердый раствор (¹¹). При этом на межфазной границе феррит — цементит возникнет повышенная концентрация некарбидообразующих примесных элементов (¹²).

В данном случае для частиц цементита, образовавшегося в межкristаллитных сочленениях, обогащение их границ с матрицей будет особенно сильно по фосфору.

Наличие этой неоднородности приводит к ослаблению связи цементита с матрицей и может явиться основной причиной хрупкого межкristаллитного разрушения. Факт ослабления сцепления карбидных частиц с матрицей отмечают и другие исследователи (⁶, ¹³). Кроме того, эффект охрупчивания усиливается благодаря пластинчатой форме выделившегося цементита, поскольку такая форма выделений дает значительную площадь межфазных феррито-цементитных границ.

Отсутствие хрупкости после отпуска при 650° объясняется рассасыванием обогащения на феррито-цементитных границах благодаря более высокой диффузионной подвижности атомов фосфора, хотя в межкristаллитных сочленениях по-прежнему останется повышенная концентрация фосфора.

С этих позиций также находит объяснение и причина охрупчивания вязких образцов (ранее испытывших отпуск при 650°) при вторичном отпуске (525°).

На поверхности изломов образцов, подвергшихся двукратному отпуску (при 650 и 525°), наблюдается два типа выделений (рис. 2а): крупные, округлые, подобные тем, что образуются при однократном отпуске при 650°, и мелкодисперсные пластинчатые, схожие с описанными выше для однократного отпуска при 525°. Очевидно, наблюдаемые выделения образовались на разных этапах термообработки и представляют собой две генерации карбидной фазы, соответствующие разным температурам отпуска. Эти наблюдения дают возможность утверждать, что крупные округлые карбиды (первая генерация) образовались в ходе первого отпуска при 650°, а при вторичном отпуске при 525° происходит выделение дополнительной порции карбидов в виде тонких пластинок (вторая генерация). Карбиды второй генерации, выделившиеся в обогащенных межкristаллитных зонах, имеют обогащенные фосфором межфазные границы и приводят к охрупчиванию, подобно тому как это происходит при однократном отпуске при 525°. Однако количество выделившихся карбидов при вторичном отпуске уже меньше и соответственно степень хрупкости слабее.

Образование при двукратном отпуске двух генераций карбидной фазы стало особенно отчетливо видно после увеличения времени выдержки первичного отпуска (650°), так как карбиды первой генерации при этом сильно укрупнились (рис. 2б).

Аналогичным путем происходит охрупчивание стали при медленном охлаждении от 650°. Оно и в этом случае связано с карбидными выделениями второй генерации, но образующимися уже в процессе медленного охлаждения. Хрупкость, возникшая в результате отпуска при 525°, устраняется отпуском при 650°, хотя пластинчатые выделения цементита при этом не исчезают. Следовательно, с повышением температуры, когда активизи-

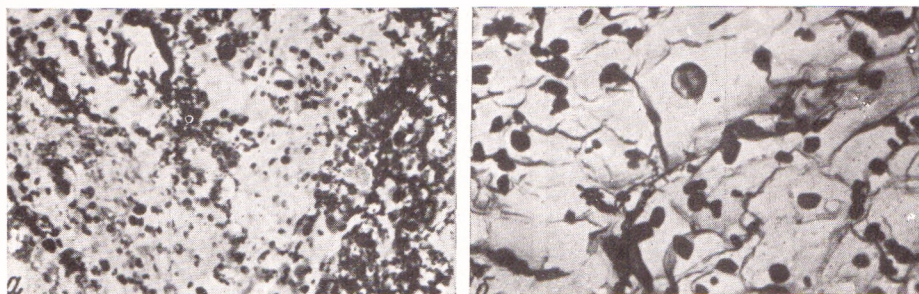


Рис. 1. Микрофрактограммы изломов стали после отпуска при режимах: *a* – 525°, 1 час, охлаждение в воде; *б* – 650°, 1 час, охлаждение в воде. 13 500×

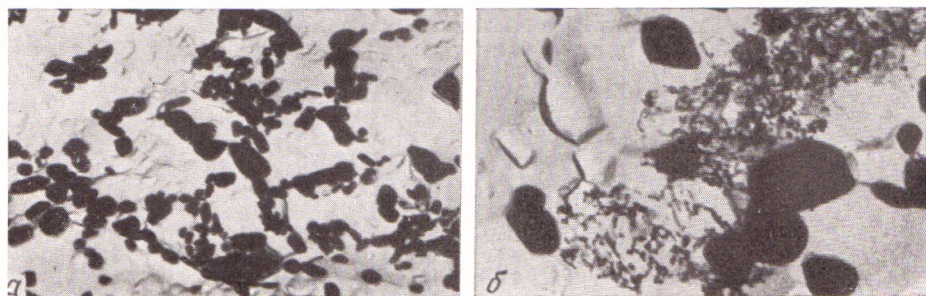


Рис. 2. Микрофрактограммы изломов стали после двукратного отпуска по режимам: *a* – 650°, 1 час, охлаждение в воде и 525°, 1 час, охлаждение в воде; *б* – 650°, 100 час., охлаждение в воде и 525°, 1 час, охлаждение в воде. 13 500×

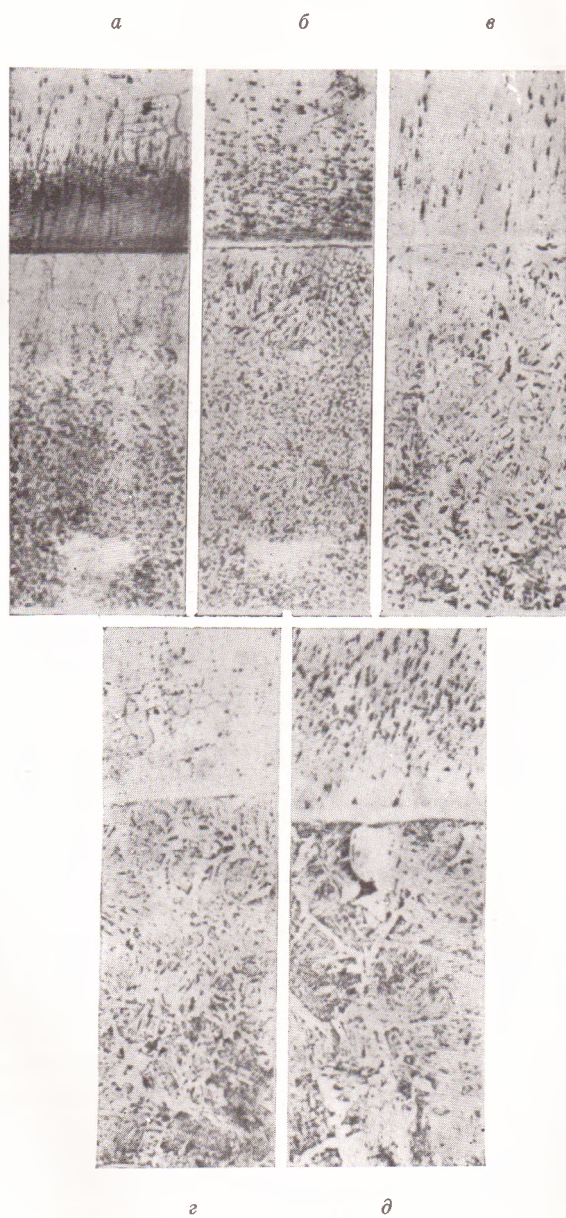


Рис. 2. Микроструктура соединений разнородных сталей (сталь 1X18H9T,верху+сталь 45,внизу) после нагрева при 750° С (а), 850 (б), 950 (в), 1050 (г) и 1150 (д) в течение 24 час. (100×, уменьшено при печати в 2 раза)

руются диффузионные процессы, происходит устранение обогащения фосфором феррито-цементитных границ.

Исходя из изложенного выше, мы считаем необходимым отметить, что издавна употребляемый применительно к отпускной хрупкости стали термин «обратимая» не совсем верен, так как при вторичном и последующих отпусках происходит не возвращение прежнего хрупкого состояния, а возникновение нового в связи с последовательными стадиями карбидообразования и перераспределения фосфора.

Полученные в работе данные объясняют и такие особенности проявления отпускной хрупкости, как уменьшение склонности стали к охрупчиванию при многократных циклических отпусках или длительных выдержках при высокой температуре отпуска, изменение хрупкой прочности с увеличением выдержки в зоне температуры развития отпускной хрупкости и др.

В заключение мы благодарим Л. А. Позняка, Я. И. Спектора, В. В. Левитина, А. Н. Курасова и В. И. Бобенко, оказавших содействие и помощь в проведении исследований, связанных с фрактографией и микрорентгено-спектральным анализом.

Донецкий физико-технический институт
Академии наук УССР

Поступило
28 IX 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Архаров, ДАН, т. 50, 293 (1945). ² В. С. Woodfine, J. Iron Steel Inst., v. 173, 229 (1953). ³ В. Д. Садовский, Металловед. и термическая обработка металлов, № 6, 24 (1957). ⁴ Л. М. Утевский, Отпускная хрупкость стали, 1961. ⁵ R. G. C. Hill, J. W. Martin, Metal Treatment and Drop Forging, v. 29, 203, 301 (1962). ⁶ J. R. Low, Trans. Met. Soc. AIME, v. 245, 12, 2481 (1969). ⁷ В. А. Архаров, Тр. Инст. физ. мет. УФАН СССР, т. 20, 201 (1958.) ⁸ В. И. Архаров, С. Д. Вангенгейм, Сборн. Вопросы физики конденсированного состояния, Киев, 1969, стр. 15. ⁹ В. И. Архаров, Е. С. Мархасин, Э. А. Самойленко, Физ. мет. и металлвед., т. 29, 5, 987 (1970). ¹⁰ Г. В. Курдюмов, Сборн. Вопросы физики металлов и металлостроения. Киев, 1950, № 2, стр. 3. ¹¹ М. В. Белоус, В. Г. Черепин и др., Превращения при отпуске стали, 1973. ¹² И. Е. Лев, Сборн. Кристаллизация металлов, Изд. АН СССР, 1960, стр. 231. ¹³ P. A. Restaino, C. J. McMahon, Trans. ASM, v. 60, 669 (1967).