

ЗАМЕДЛЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ КАК РЕЗУЛЬТАТ СНИЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ОСТАТОЧНЫМИ МИКРОНАПРЯЖЕНИЯМИ И СЕГРЕГАЦИЯМИ ФОСФОРА

Мишин В.М.*, Филиппов Г.А., Щитов Д.В.***

* ФГАОУ ВПО Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорск, Россия

** ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», ИКС, Москва, Россия

mishinvm@yandex.ru

При закалке, в стали в результате фазового превращения аустенита в мартенсит образуются ослабленные структурные зоны – границы исходных аустенитных зерен [1] (для сокращения далее по тексту «границы зерен»). На них выходят кристаллы образовавшегося мартенсита, перед вершинами которых образуются области объемного растяжения – источники остаточных внутренних микронапряжений [1,5]. Кроме того, происходит образование зернограничных сегрегаций охрупчивающих примесей (фосфора, сурьмы и олова) [1]. Эти процессы приводят к реализации замедленного разрушения закаленной стали [2-7]. В связи с этим, актуально изучение аддитивного (и раздельного) влияния перечисленных микроструктурных факторов на локальную прочность границ зерен.

Целью исследования являлось разделение влияния остаточных микронапряжений и сегрегации фосфора на снижение локальной прочности границ зерен мартенситных сталей, приводящее к снижению сопротивления замедленному разрушению.

Материал и методика исследования.

Изучали влияние микроструктурных факторов (примеси фосфора и остаточных внутренних микронапряжений) на локальную прочность границ зерен стали 18Х2Н4ВА с атомным содержанием фосфора (0,005%; 0,010%; 0,012%; 0,028%; 0,040%). Образцы тип Шарпи подвергали закалке в воду с последующей изотермической выдержкой в γ – области. Для исключения обезуглероживания поверхности образцы перед термообработкой помещали в кварцевые ампулы, после чего откачивали из них воздух. После термообработки образцы держали на воздухе (отдых) 30 мин, 50 ч и 100 ч, после чего для сохранения структурного состояния (уровня остаточных микронапряжений) образцы содержали в жидком азоте вплоть до испытаний. Таким образом, получали образцы с различными уровнями остаточных микронапряжений.

Для вскрытия границ зерен проводили испытания на замедленное разрушение (ЗХР) путем нагружения образцов сосредоточенным изгибом до заданной нагрузки и дальнейшей выдержке до разрушения. Момент зарождения трещины (τ) регистрировали с помощью метода акустической эмиссии. Для определения локальных напряжений в зоне зарождения трещины использовали метод конечных элементов МКЭ. Расчет локальных растягивающих напряжений (σ_{11max}) в зоне локального разрушения на границе пластической и упругой зон перед вершиной надреза (рис.1) проводили по методике, изложенной в [1,6].

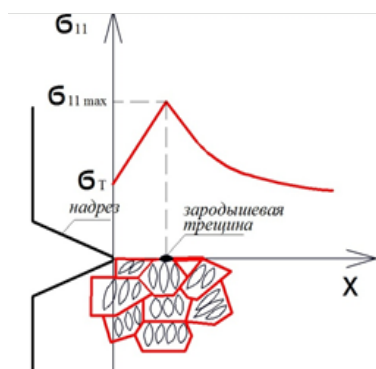


Рисунок 1- Схема, зарождения трещины на границе исходного аустенитного зерна в месте локализации максимального локального растягивающего напряжения σ_{11max} в вершине надреза в зоне стеснения деформации.

Содержание примеси фосфора на поверхности излома в зоне зарождения трещины определяли методом ОЖЕ-спектрометрии.

Результаты эксперимента

По результатам расчета МКЭ построены кривые замедленного разрушения в координатах: локальное растягивающее напряжение ($\sigma_{11\max}$) – время до регистрации момента зарождения трещины (τ) (рис.2).

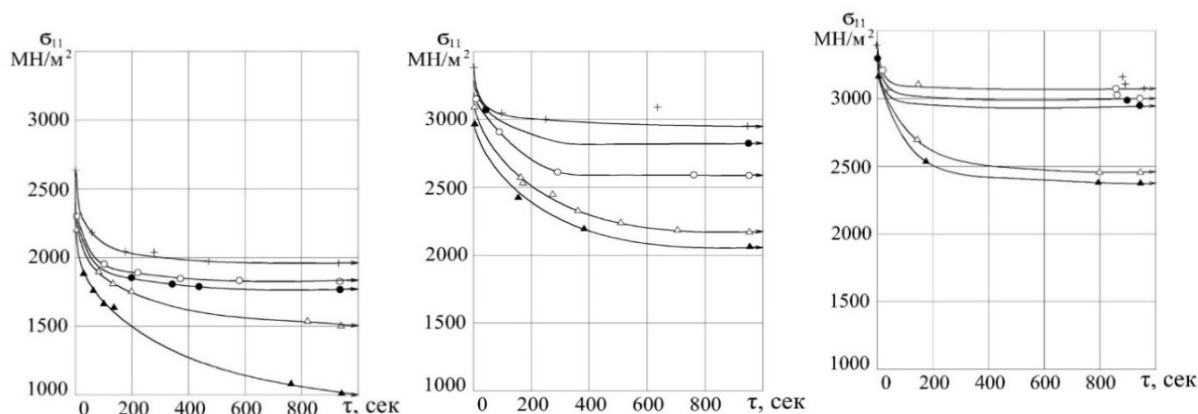


Рисунок 2 - Кривые замедленного разрушения стали 18X2H4BA при различном количестве примеси фосфора: + – 0,005; ● – 0,010; ○ – 0,012; Δ – 0,028; ▲ – 0,040 ат.% P после отдыха: а) 30 мин; б) 50 ч; в) 100 ч.

Обсуждение результатов

Уровень порогового локального растягивающего напряжения $\sigma_{11\max}$ (ниже которого разрушение не происходило) для каждой кривой ЗХР соответствует локальной прочности границы зерна [7]. Влияние остаточных внутренних микронапряжений, сегрегаций примеси фосфора и электролитического наводороживания на процесс локального охрупчивания границ зерен изучали на конструкционной стали 18X2H4BA. В результате испытаний сосредоточенным изгибом образцов типа Шарпи из стали 18X2H4BA на замедленное разрушение по методике изложенной в [1] были определены пороговые значения $\sigma_{11\max}$ после различного времени отдыха для сталей с различным содержанием фосфора в стали (рис.3).

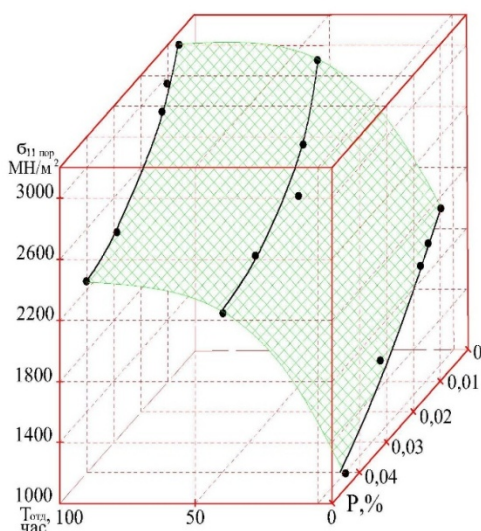


Рисунок 3 - Разделение влияния атомного содержания примеси фосфора (P,%) в стали и времени отдыха после закалки ($T_{\text{отд}}$) на величину порогового локального напряжения стали 18X2H4BA.

Пороговые значения $\sigma_{11\max}$ характеризуют локальную прочность границы зерна. На рис.3 показано, что увеличение содержания примеси фосфора (P,%) и уменьшение времени отдыха после закалки снижают величину порогового локального напряжения стали 18X2H4BA. Полученная поверхность пороговых локальных напряжений мартенситной стали после закалки позволяет разделить вклады отдыха стали после закалки и атомного содержания фосфора. Причиной охрупчивания границ зерен мартенситной стали помимо остаточных внутренних микронапряжений являются сегрегации охрупчивающих примесей на границах зерен. Поэтому, являлось важным определить содержание фосфора непосредственно на границах зерен, что было реализовано с помощью метода ОЖЕ-спектрометрии. Уровни остаточных внутренних микронапряжений в зоне зарождения микротрещины определяли с помощью метода [1], разработанного авторами в ЦНИИчермет. Это позволило построить трехмерную зависимость локальной прочности границ зерен от концентрации примеси фосфора на границах зерен и уровня остаточных микронапряжений в зоне локального разрушения (рис.4).

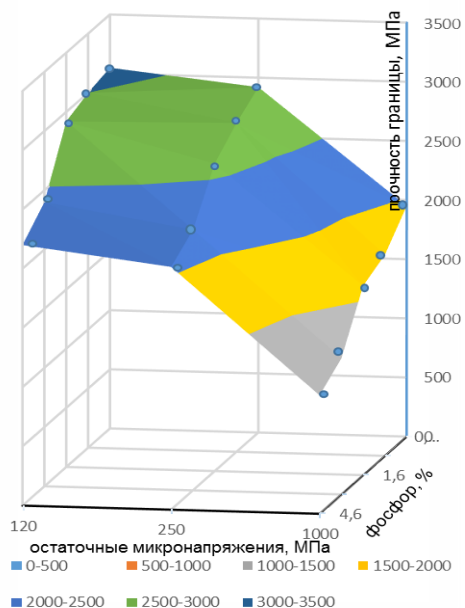


Рисунок 4 - Зависимости локальной прочности границ зёрен от атомной концентрация фосфора и уровня остаточных микронапряжений на границе зерна стали 18X2H4BA.

Установлено, что увеличение концентрации фосфора на границах зерен в виде сегрегаций приводит к снижению локальной прочности границ исходных зерен аустенита в мартенситной стали и общему снижению локальной прочности границ при увеличении уровня остаточных микронапряжений в результате сокращения времени отдыха стали после закалки (рис.4). В результате, сопротивление замедленному разрушению снижается. Для сравнения, путем активного разрушения определили локальную прочность тела зерен стали 18X2H4BA при пренебрежимо низком уровне остаточных микронапряжений (отпуск, 100°C, 2 ч) и чистой по примеси фосфора, которая составила $\sigma_F = 3520$ МПа.

Заключение

Установлено, в какой мере снижение прочности границ исходных аустенитных зёрен приводит к увеличению склонности стали к замедленному разрушению в закаленном состоянии. Установлена зависимость локальной прочности границы зерна от соотношения различных уровней остаточных микронапряжений и атомной концентрации примеси фосфора на границе зерна в местах его сегрегации.

Список литературы

1. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Физика замедленного разрушения сталей. Мин.-Воды: Полиграфпром, 2013.- 455 с.
2. Chun Y. S., Park K.-T., and Lee C. S. // Delayed static failure of twinning-induced plasticity steels, Scr. Mater., vol. 66, no. 12, pp. 960–965, Jun. 2012.
3. Sarrak V.I., Mishin V.M. Delayed failure of steels // Materials Science. -1992. -V. 28, № 5. -P. 419-420.
4. Mishin V.M., Sarrak V.I. Critical local tensile stress as criterion of delayed brittle failure // Strength of Materials. -1985. -V. 17, Issue 3. -P. 348–352.
5. Mishin V.M., Sarrak V.I. Evaluation of the influence of residual internal microstresses on the strength of 18Kh2N4VA steel with the use of the criterion of tensile stresses // Strength of Materials. -1986. - V. 18, Issue 4. -P. 482–487.
6. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Критерий и физико-механическая характеристика сопротивления стали замедленному разрушению // Деформация и разрушение материалов. -2007. -№ 3. -С. 37-42.
7. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Кинетическая модель замедленного разрушения закаленной стали. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. -2008. -№ 3. -С. 28-33.