

О. П. РОМАНОВ, Ю. В. ЗИМА, академик АН УССР Г. В. КАРПЕНКО

О МЕХАНИЗМЕ ЗАМЕДЛЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЯХ

Одна из особенностей высокопрочных закаленных сталей — их склонность к замедленному разрушению, которое может происходить под влиянием длительных внешних нагрузок или в результате воздействия внутренних напряжений. Эта склонность усиливается с ростом неравновесности структурного состояния мартенсита, в том числе при резкой закалке с повышенных температур, увеличении содержания углерода в стали, снижении температуры отпуска (1).

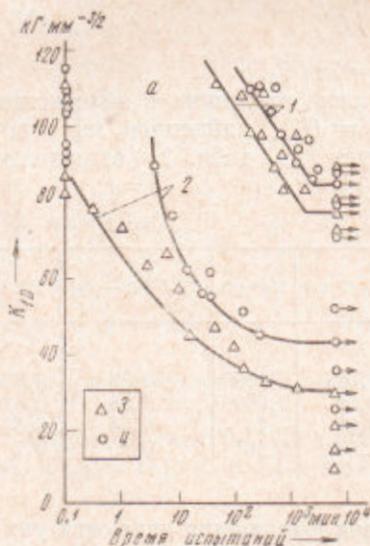


Рис. 1. Диаграммы замедленного распространения трещины в стали 60ХС (а) и схемы, иллюстрирующие последовательный рост замедленной трещины (б): 1 — испытания в сухом воздухе, 2 — испытания в дистиллированной воде; 3 — закалка, отпуск при 200° С; 4 — ВТМО, отпуск при 200° С

Весь процесс замедленного разрушения можно разделить на три стадии: а) образование зародышевых трещин, б) их медленное подрастание до критического размера, в) спонтанное распространение критической трещины до полного разрушения (долом). Первые две стадии сравнительно длительны и характеризуют практически полный ресурс долговечности изделия. На третьей, протекающей в закален-

ных сталях мгновенно, поведение материала определяется кратковременными характеристиками вязкости разрушения (K_{1c} или G_{1c}). В то же время пока нет еще надлежащей ясности в механизмах образования и подрастания замедленных трещин.

Ниже приводятся результаты исследования процесса замедленного подрастания трещин в неотпущенных (свежезакаленных) и низкоотпущенных сталях с различным содержанием углерода — 40ХС, 60ХС и 9ХС. После термообработки бадочные образцы с конструктивными концентраторами типа односторонней выточки подвергали циклическим нагрузкам с целью наведения в вершине концентратора трещины усталости регламентированной длины. Замедленное подрастание трещины наблюдали при чистом изгибе постоянным моментом. При этом кроме построения диаграмм замедленного разрушения (в координатах: исходный коэффициент интенсивности напряжений K_{1D} — время) проводили наблюдения кинетики подрастания трещин. Прицельно-статический электроннофрактографический анализ поверхностей изломов проводили с использованием целлулоид-угольных реплик без оттенения. При этом даже визуальный просмотр

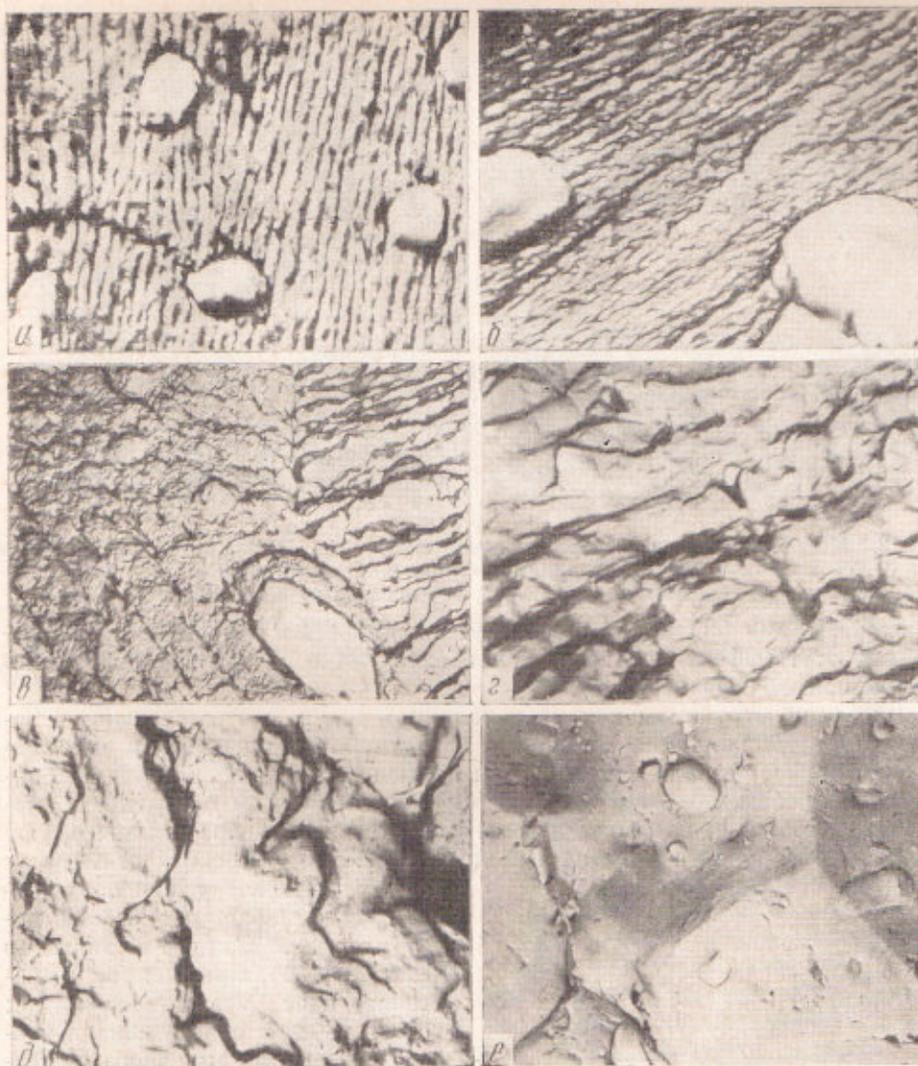


Рис. 2. Электронные фраттограммы изломов закаленной стали 60ХС (отпуск при 200° С), соответствующие участкам замедленного распространения трещины (а—д) и долому (е): а—е — испытания на воздухе, $K_{ID} = 93,2 \text{ кг}\cdot\text{мм}^{-1/2}$; г, д — испытания в водной среде; г — $K_{ID} = 72,3 \text{ кг}\cdot\text{мм}^{-1/2}$; е — $K_{ID} = 57,6 \text{ кг}\cdot\text{мм}^{-1/2}$, 4700 ×

позволяет произвести разделение участков поверхностей разрушения, соответствующих замедленному росту трещин и кратковременному долому.

Как следует, в частности, из рис. 1, для склонных к замедленному разрушению низкоуглеродистых сталей существует безопасный уровень K_{ID} , ниже которого отсутствует замедленное подрастание трещин. Для сталей рассматриваемого класса в случае испытаний на воздухе этот уровень может быть определен при базе испытаний 10^4 мин. (около 7 суток). При равных K_D скорость подрастания трещины увеличивается с повышением содержания углерода в стали и снижением температуры отпуска. Подрастание трещины обычно ускоряется во времени, что объясняется увеличением фактического коэффициента интенсивности с ростом длины трещины. Подвод к вершине трещины малоактивной адсорбционной среды (дистиллированная вода) резко (на порядок и более) ускоряет рост трещины. Закаленная сталь, полученная из деформированного аустенита (обработка

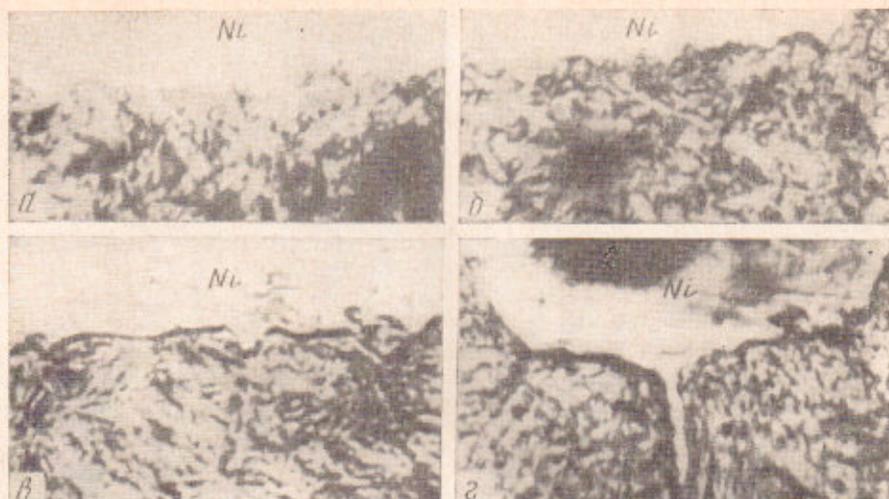


Рис. 3. Микрогеометрия профилей изломов закаленной стали 60ХС (отпуск при 200° С), соответствующих замедленному распространению трещины (а — в) и долому (г): а — б — испытания на воздухе, в — испытания в водной среде. 4320 ×

по схеме ВТМО (2)) имеет сниженную склонность к замедленному разрушению. Этот эффект проявляется наиболее четко в случае воздействия адсорбционной среды (рис. 1).

Для микроструктуры излома закаленной стали, соответствующего замедленному подрастанию трещины, характерна специфическая полосчатость (рис. 2), которая как показали исследования профиля изломов, покрытых никелем, является результатом образования на поверхности выступов (гребешков) или впадин (рис. 3 а — в). Линии полос характеризуют расположение фронта монотонно подрастающей трещины. В отличие от долома, который у низкоопущенных свежезакаленных сталей носит интеркристаллитный характер (рис. 2е и 3г), замедленное подрастание идет транскристаллитно; только изредка обнаруживали участки интеркристаллитного замедленного излома, отличающегося все той же характерной полосчатостью (рис. 2в).

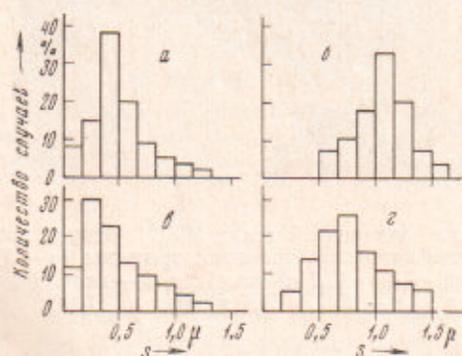


Рис. 4. Гистограммы распределения шага ступенек на поверхности излома при замедленном разрушении стали 60ХС (отпуск при 200° С): а — закалка, $K_{1D} = 93,2 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-3/2}$; б — закалка, $K_{1D} = 72,4 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-3/2}$; в — ВТМО, $K_{1D} = 93,2 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-3/2}$; г — ВТМО, $K_{1D} = 75,4 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-3/2}$; а и в — испытания на воздухе, б и г — испытания в водной среде

Обращает на себя внимание монотонность рельефа, проявляющаяся прежде всего в сравнительном постоянстве межполосчатых интервалов (рис. 2). Небольшие карбидные включения (размером 0,1 — 0,2 μ) не оказывают заметного влияния на кинетику продвижения трещины. Только крупные частицы ($\varnothing = 1 \mu$ и более) нарушают монотонность ступенчатого рельефа. Учитывая постоянство ширины полос, имелась возможность произвести статистическую оценку расстояния между гребешками (шаг s). На рис. 4 показаны примеры построения соответствующих гистограмм для параметра s . Сопоставление среднестатистической величины s со скоростью роста трещины показало, что шаг увеличивается с ростом скорости трещины. Этот вывод проявляется с наибольшей

наглядностью, когда трещина растет при воздействии адсорбционной среды. Тогда резкому увеличению скорости продвижения трещины (на порядок и более) соответствует значительное уширение полос. При этом также меняется их морфология: фронт трещины развивается с локальными разрывами и характерной волнистостью, которая, по-видимому, знаменует протекание пластической деформации при образовании укрупненных квазискользящих фасеток.

Образование микрополос на поверхности разрушения — явление, типичное для усталости, оно обусловлено циклическим изменением напряжений^(3, 4). Возникновение полос при замедленном разрушении закаленных сталей под воздействием статических нагрузок можно объяснить, привлекая вакансионную гипотезу роста замедленных трещин, которая для случая ползучести достаточно хорошо разработана в⁽⁵⁾.

Для простоты рассмотрим процесс подрастания наружной трещины, расклиниваемой постоянно действующим изгибающим моментом M (рис. 16). Незакрепленные дефекты будут стекаться (диффундировать) из сильно растянутых объемов в слабо растянутые (зона А), что приведет к образованию в подповерхностном слое микропоры. Последняя будет увеличиваться вплоть до того момента, когда при достижении критического уточнения произойдет разрыв перемычки, отделяющей пору от основной трещины. Затем начинается новый цикл. Места разрывов в момент присоединения пустот фиксируются на фрактограммах в виде гребешков, расположенных вдоль фронта распространяющейся трещины. Чем ниже пластичность стали, тем на большем расстоянии от кончика трещины происходит затухание локальных напряжений, следовательно, расстояние от кончика к центру микропоры увеличивается. Однако тогда в связи с высоким градиентом напряжений, высокой концентрацией незакрепленных дефектов* и низким уровнем эффективной поверхностной энергии рост укрупненной поры и ее слияние с трещиной ускоряется.

Необходимо особо остановиться на случае замедленного распространения трещины при сильно выраженном воздействии адсорбционной среды. Тогда в связи с резким снижением эффективной поверхностной энергии значительно облегчается рост трещины, а подповерхностные поры играют, в основном, роль фактора, задерживающего трещину. Об этом свидетельствует крупномасштабное строение поверхности разрушения на границе очередной удлиненной ступени, связанное с протеканием значительной пластической деформации при переходе к микропустоте, притупляющей трещину.

В заключение добавим, что периодичность рельефа при замедленном распространении трещины в закаленных сталях может быть также объяснена, исходя из представлений о флуктуационной природе роста трещин⁽⁷⁾. Отклонения (в отдельные моменты времени) физической прочности от наиболее вероятной могут обуславливать скачкообразное продвижение трещины. В этом случае необходимо однако постулировать, что характер кривой частотного распределения физической прочности должен резко зависеть от концентрации незакрепленных дефектов, сохранившихся после полиморфного превращения (закалки) стали.

Физико-механический институт
Академии наук УССР
Львов

Поступило
17 V 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. М. Потак, Хрупкие разрушения стали и стальных деталей, М., 1955.
² М. Л. Бернштейн, Термомеханическая обработка металлов и сплавов, М., 1968.
³ К. Д. Бичем, Р. М. Пеллу, В кн. Прикладные вопросы вязкости разрушения, М., 1968. ⁴ D. A. Meun, Trans. ASM, 61, 42 (1968). ⁵ И. А. Одинг, В. С. Иванова, ДАН, 103, 77 (1955). ⁶ W. Köster, Zs. Metallkunde, 32, 282 (1940). ⁷ С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев, ЖТФ, № 10, 1677 (1953).

* Концентрация незакрепленных дефектов тем выше, чем слабее прошли процессы старения или отпуска, следовательно, больше хрупкость стали.