

Академик АН УССР Г. В. КАРПЕНКО, Х. Б. КАЛИНИЧЕНКО,
И. В. КОКОТАЙЛО, А. Б. КУСЛИЦКИЙ

О ХАРАКТЕРЕ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

По данным исследователей (¹⁻³), при высоких циклических нагрузках границы зерен могут служить очагами разрушения; в частности, в работе (²) показано, что для металлов с явно выраженной площадкой текучести при действии высоких циклических нагрузок характерно межзеренное разрушение. Однако до настоящего времени переход от транскристаллитного к интеркристаллитному разрушению при повышении уровня циклических напряжений (деформаций) исследован недостаточно, особенно для высокопрочных конструкционных сталей, эксплуатирующихся в режиме малоциклового усталости.

В связи с этим нами исследован переход от транскристаллитного к интеркристаллитному разрушению при малоциклового усталости трех высокопрочных малоуглеродистых хромоникельмолибденовых сталей с пределом текучести и поперечным сужением (при растяжении), соответственно: сталь А 60 кг/мм² и 69%; сталь Б 90 кг/мм² и 59%; сталь В 125 кг/мм² и 54%.

Таким образом, исследуемые стали существенно различаются по уровню прочности, несколько меньше — по пластичности, и, несмотря на сравнительно высокую прочность, все указанные стали обнаруживают при растяжении площадку текучести. Микроструктура всех сталей представляет собой высокоотпущенный мартенсит.

Испытания на малоцикловую усталость вели на гладких образцах толщиной 2,5 мм отнулевым изгибом на машинах ИП-2 (⁴) при относительных деформациях крайнего волокна (ϵ , %), обеспечивающих одинаковые для всех сталей соотношения $\epsilon/\epsilon_{0,2}$ равные 0,5; 0,6; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5. $\epsilon_{0,2}$ — относительная деформация крайнего волокна образца, соответствующая пределу текучести стали при изгибе, который определяется с учетом неупругих явлений (^{5, 6}) по статической кривой изгиба образца.

Полированные и протравленные для выявления границ первичных аустенитных зерен образцы подвергали малоциклового нагружению на пяти уровнях $\epsilon/\epsilon_{0,2}$ до появления первой трещины. Затем трещину исследовали в металлографическом микроскопе МИМ-7 и определяли характер разрушения, который классифицировался как транскристаллитный, если более 80% длины трещины проходит по телу зерна, или интеркристаллитный, если более 80% длины трещины проходит по границам зерен. При промежуточных соотношениях межзеренной и внутривзеренной компонент разрушения характер разрушения классифицировался как смешанный.

Для определения характера разрушения проводились также электронно-фрактографические исследования образцов, разрушенных на тех же пяти

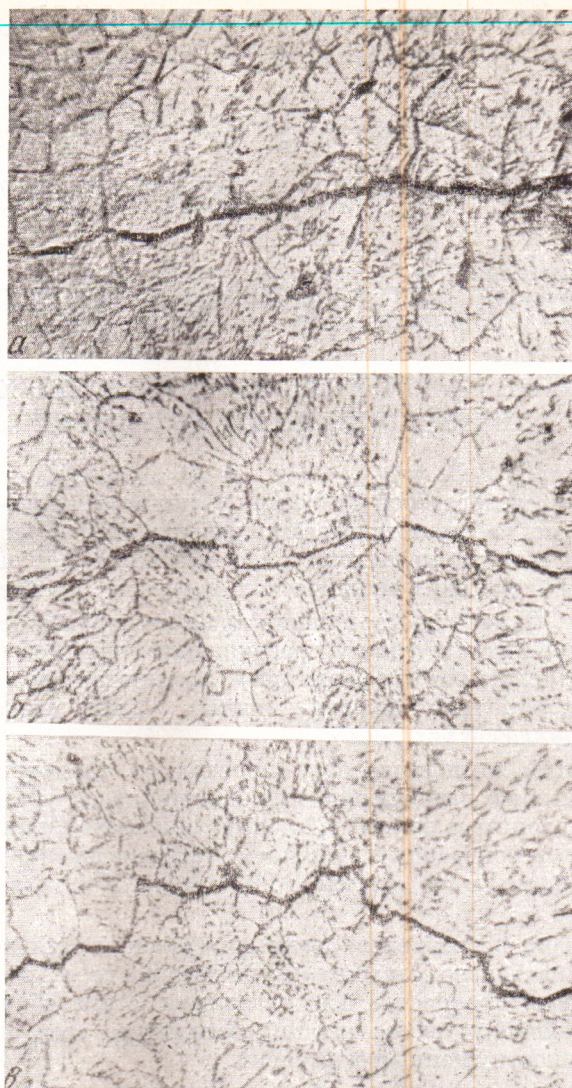


Рис. 1. Трещины малоциклового усталости стали В при $\epsilon/\epsilon'_{0,2}=0,5$ (а), 1 (б) и 1,5 (в). 350 \times

уровнях нагружения. С поверхностей изломов снимали двухступенчатую пластиноугольную реплику и исследовали в электронном микроскопе УЭМ-100 ту часть поверхности излома, которая соответствует зоне развития усталостной трещины со стороны максимальных растягивающих напряжений.

Как показали испытания, малоцикловая выносливость всех исследуемых сталей подчиняется закономерности Коффина (⁷), причем в исследованном диапазоне деформаций перелома кривых усталости не обнаружено, а величины долговечности сталей при равных относительных деформациях пропорциональны их характеристикам прочности.

Металлографические исследования показали, что характер разрушения всех исследуемых сталей определяется соотношением $\epsilon/\epsilon_{0,2}$, т. е. зависит от уровня приложенных деформаций и прочности стали. Так, при

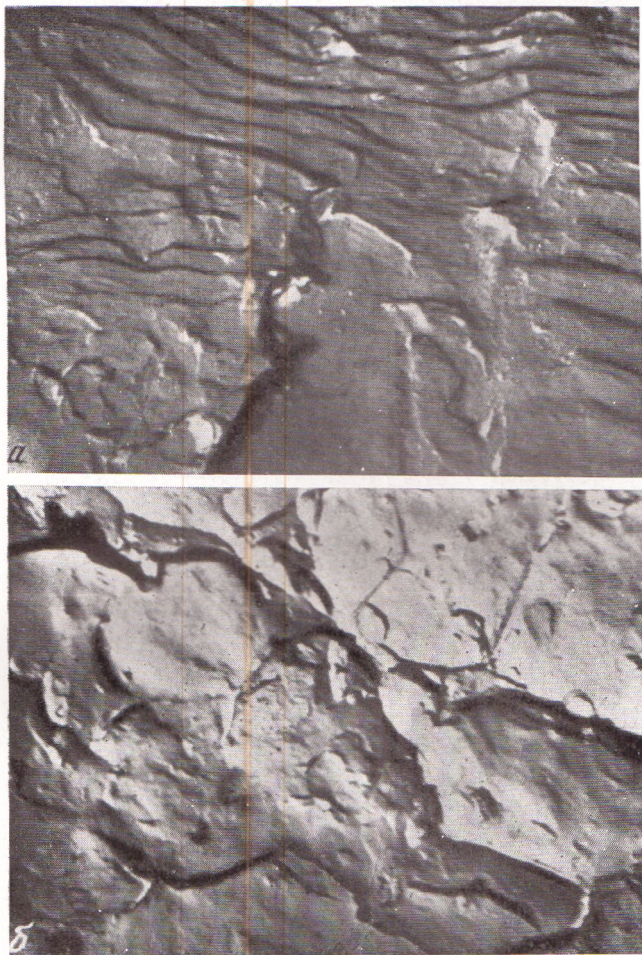


Рис. 3. Электронные фраттограммы образцов стали В, разрушенных при малоциклоной усталости при $\epsilon/\epsilon'_{0,2} = 0,5$ (а) и 1,25 (б). 3000 \times

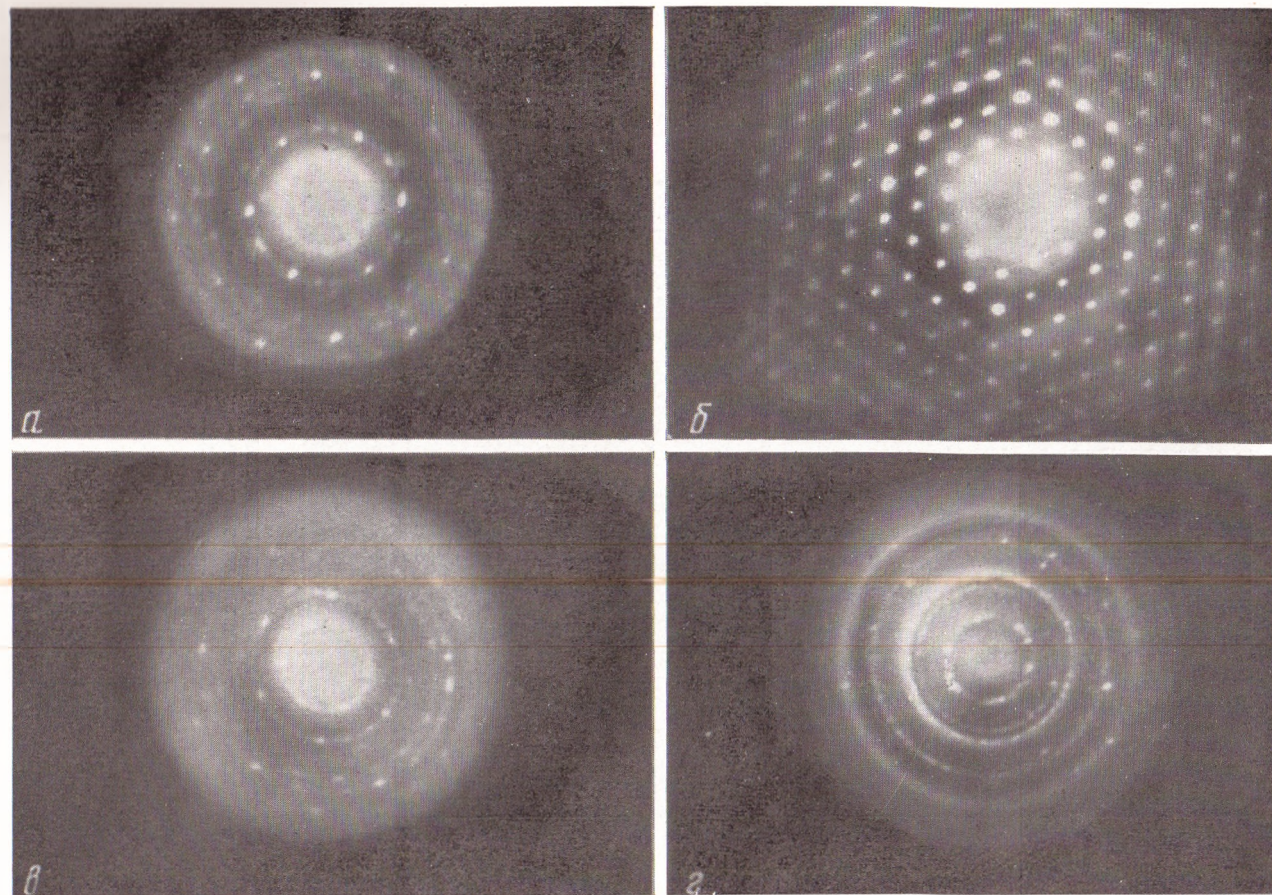


Рис. 1. Электронограммы образцов диатомита (а), аэросила (б), силикагеля (в), контрольного образца кристобаллита ИРЭА (г)

$\epsilon/\epsilon'_{0,2} \leq 0,75$ для всех исследованных сталей наблюдается транскристаллитное, а при $\epsilon/\epsilon'_{0,2} \geq 1,25$ — интеркристаллитное разрушение. При уровнях нагрузки, соответствующих $\epsilon/\epsilon'_{0,2} = 0,75-1,25$ наблюдается смешанное разрушение. На рис. 1 показаны фотографии типичных трещин малоциклового усталости стали В.

Если учесть, что для каждой из исследуемых сталей уровень деформаций, при которых наступает текучесть, разный (для стали А $\epsilon_{0,2} = 0,45\%$, для стали Б — $0,62\%$, для стали В — $0,95\%$), т. е. переходная зона, соответствующая указанному диапазону деформаций $\epsilon/\epsilon'_{0,2} = 0,75-1,25$, для исследуемых сталей будет иметь вид заштрихованной зоны, изображенной на рис. 2. Ниже этой зоны разрушение будет транскристаллитное, выше — интеркристаллитное, а в диапазоне деформаций, соответствующих заштрихованной зоне, разрушение смешанное.

Электронно-фрактографические исследования показали, что при относительных деформациях $\epsilon/\epsilon'_{0,2} = 0,5$ поверхности разрушения для всех исследуемых сталей имеют характерный для усталости (8) вид с типичными бороздками усталости (рис. 3а). При повышении уровня деформаций доля усталостного излома уменьшается и появляются участки квазистатического разрушения. При больших амплитудах деформации в зоне зарождения усталостной трещины у поверхности наблюдаются участки межзеренного разрушения (рис. 3б).

Металлографические и электронно-фрактографические исследования перехода от транскристаллитного к интеркристаллитному разрушению при малоциклового усталости трех марок высокопрочной хромоникельмолибденовой стали позволяют заключить, что переход от транскристаллитного к интеркристаллитному разрушению зависит от уровня прочности стали и происходит при деформациях, примерно соответствующих условному пределу текучести при изгибе; электронная фрактография изломов образцов высокопрочных сталей, разрушенных при малоциклового усталости, дает возможность классифицировать разрушение как усталостное при деформациях на 20–30% ниже деформации, соответствующей пределу текучести при изгибе. При увеличении уровня деформации разрушение можно классифицировать как квазистатическое с участками межзеренного разрушения в зоне развития трещины.

Физико-механический институт
Академии наук УССР

Поступило
29 IV 1974

Украинский полиграфический институт
им. И. Федорова
Львов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ R. N. Stevens, J. Inst. Met., v. 94, № 4 (1966). ² В. С. Иванова, Изв. АН СССР, ОТН, Мет. и топливо, № 6, 90 (1962). ³ D. N. Overy, W. A. Backofen, Acta Met., v. 9, 352 (1963). ⁴ В. И. Ткачев, Ю. И. Бабей, Физ.-хим. мех. матер., № 2, 228 (1966). ⁵ И. Л. Дикович, Статика упруго-пластических балок судовых конструкций, Л., 1967. ⁶ И. А. Одинг, Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов, М., 1947. ⁷ L. F. Coffin, Trans. ASME, v. 79 (1957). ⁸ К. Д. Бичем, Р. М. Н. Пеллу, Сборн. Прикладные вопросы вязкости разрушения, М., 1968.

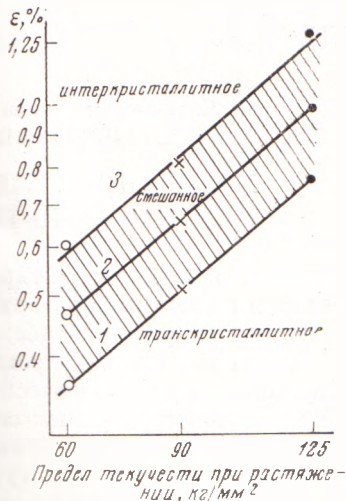


Рис. 2. Зависимость типа разрушения при малоциклового усталости от величины относительной деформации крайнего волокна и показателя прочности стали (предела текучести при растяжении). Экспериментальные точки на границах областей соответствуют различным соотношениям $\epsilon/\epsilon'_{0,2}$: 1 — 0,75; 2 — 1,0; 3 — 1,25