

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Я. Б. ФРИДМАН и Б. А. ДРОЗОВСКИЙ

**О ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ОТ ДЛИТЕЛЬНОГО
НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

(Представлено академиком Г. В. Курдюмовым 3 II 1954)

Рядом исследований было показано, что разрушение материалов — процесс, идущий во времени и начинающийся значительно раньше полного разрушения образца (^{1, 2}). Для ряда характеристик прочности при $+20^\circ$ изучение процесса разрушения во времени известно (например, кривые повреждаемости при усталости (³), кривые статической трещиноватости пластмасс (⁴)). Даже очень хрупкое разрушение стекол распространяется во времени, что может быть изучено при помощи современных физических методов (⁵). Таким образом, можно различать разрушение элемента — трещину и разрушение тела — полное разрушение образца или детали.

При испытании металлов длительной постоянной нагрузкой обычно учитывается только полное разрушение образца, например при оценке склонности к замедленному хрупкому разрушению закаленных сталей (⁶); такова же общепринятая методика оценки жаропрочности сплавов при повышенной температуре. Однако не менее важна оценка момента начала «разрушения элемента» — появления трещин — или изучение «повреждаемости» от длительных нагрузок при повышенной температуре, на что обращалось внимание Л. А. Гликманом.

Ниже описано построение «кривой повреждаемости» от длительных статических нагрузок при повышенной температуре для хромо-никелевого сплава.

Плоские образцы с надрезом (см. рис. 1) подвергались растяжению при 600° постоянной нагрузкой, прилагаемой эксцентрично; таким образом, кроме растяжения возникал также изгиб. Это создало значительный градиент напряжений и деформаций, увеличило относительное время распространения трещин и облегчило наблюдение за их возникновением и развитием. Образцы одной и той же плавки испытывались в двух состояниях: мелкозернистом (исходном, после закалки с 1050°) и крупнозернистом (после дополнительной закалки с 1200° , выдержка 20 мин., охлаждение на воздухе). Часть образцов испытывалась до полного разрушения, а остальные при меньших промежутках времени. Плоскости образцов после их испытания шлифовались, полировались, и под микроскопом при увеличении 620 изучалось развитие трещин. Часть образцов была отполирована по плоскости до испытания; в этом случае наблюдение за развитием трещин велось непосредственно на одном и том же образце в перерывах нагружения. Излом образцов, разрушенных длительным нагружением, делился на две части: а) черно-синюю поверхность длительного межкристаллического разрушения; б) золотистую поверхность кратковременного пластического внутрикристаллического разрушения.

Как видно из рис. 1, в материале с мелкозернистой структурой «длительность жизни образца» до полного разрушения несколько меньше, хотя время до появления видимой трещины («длительность жизни элемента») для мелкозернистого сплава больше, чем для крупнозернистого. Иными словами, линия повреждаемости мелкозернистого сплава располагается для данных нагрузок при больших длительностях нагружения, чем крупнозернистого, т. е. последний оказывается менее стойким к образованию начальных трещин, хотя показывает не меньшую стойкость до полного разрушения образца.

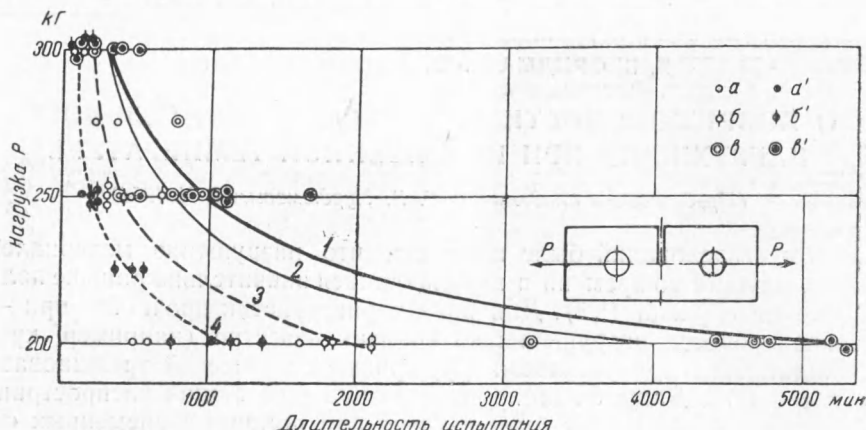


Рис. 1. Время появления трещин и окончательного разрушения образцов в зависимости от нагрузки при температуре 600° . 1 — кривая разрушения образцов из крупнозернистого сплава, 2 — кривая разрушения образцов из мелкозернистого сплава, 3 — кривая появления «первых» трещин в образцах из мелкозернистого сплава, 4 — кривая появления «первых» трещин из крупнозернистого сплава, а, б и в — мелкозернистый сплав; а', б' и в' — крупнозернистый сплав. а, а' — образцы без трещин; б, б' — образцы с трещинами; в, в' — разрушение

Из рассмотрения микрофотографий одного и того же места образца из крупнозернистого сплава на разных стадиях разрушения видно, что развитие трещин (стрелка на рис. 2 а) может быть остановлено зерном, лежащим на пути распространения трещин; при этом окончательное разрушение происходит по другому направлению (см. рис. 2 б).

В мелкозернистом сплаве (см. рис. 3) трещина проходит по более прямолинейному пути, чем в крупнозернистом. Этим, возможно, и объясняется меньшая стойкость мелкозернистого сплава до полного разрушения образца. Однако большая «продолжительность жизни» крупнозернистого сплава, обнаруженная нами (рис. 1), нуждается в дальнейших подтверждениях, так как образцам с крупнозернистой структурой присущ больший разброс свойств, чем с мелкозернистой.

Сложность оценки повреждаемости металлов, в отличие от прозрачных пластмасс, заключается в отсутствии простой методики обнаружения трещин ввиду непрозрачности металлов. Вышеописанная методика сложна для массового применения. В качестве упрощенной методики нами опробовано испытание образцов, подобное приведенному на рис. 1, на длительную прочность, не доводя образцы до полного разрушения, с последующим разрывом при $+20^{\circ}$. Окисленная при высоких температурах трещина отчетливо видна в бинокулярный микроскоп или лупу на фоне блестящего излома образца при комнатной температуре. Форма образца может быть изменена применительно к испытанию также и нелизовых материалов.

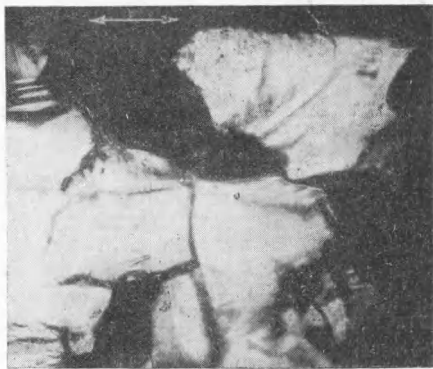
Объяснения полученных результатов следует, вероятно, искать в межкристаллическом характере разрушения во всех изученных в на-

стоящей работе случаях. Начальные трещины должны легче возникать и развиваться при большей протяженности границ каждого отдельного зерна (своеобразный структурный масштабный фактор), т. е. в крупнозернистом сплаве. Распространение же трещины (как это было показано на рис. 2 а и 2 б) при постоянном направлении напряжений может быть легче приостановлено в крупнозернистом сплаве, чем в мелкозернистом. При внутрикристаллическом разрушении (например, при $+20^\circ$) границы зерен уже не будут оказывать тормозящего влияния на развитие трещины.

Процессы возникновения и распространения трещин могут играть большую роль в вопросах жаропрочности. Так, С. Т. Кишкин (7) счи-



а



б

Рис. 2. Микрофотографии, показывающие различные стадии развития трещины при температуре 600° в образце из крупнозернистого сплава, отполированном до испытания. а — длительность 330 мин. Вторая трещина в образце (возникшая после длительности 240 мин. и развивавшаяся от места, указанного односторонней стрелкой) остановлена встретившись на ее пути ромбовидным зерном. Двусторонняя стрелка показывает направление растяжения. $\times 150$. б — длительность 450 мин. Дальнейшее разрушение произошло по измененному направлению. Двусторонняя стрелка показывает направления растяжения. Односторонняя стрелка показывает первую трещину, возникшую после длительности 180 мин. и не развивавшуюся далее. $\times 150$

тает, что явление снижения прочности в процессе нагружения постоянной нагрузкой большинства промышленных жаропрочных сплавов при реальных температурах их эксплуатации в основном связано с образованием и развитием с течением времени трещин (часто в начале второго периода ползучести), а не с процессом коагуляции или растворения упрочняющих фаз. При однократном нагружении при 20° , т. е. в случае, главным образом, внутризеренного разрушения, обычно определяются характеристики сопротивления пластической деформации и сопротивления полному разрушению образца путем отрыва или среза (8); момент начала разрушения образца при этом не учитывается. Однако в последнее время и при однократном нагружении при 20° различают характеристики до начала возникновения трещин и в процессе их распространения (9).

При длительном нагружении при повышенной температуре (межзеренное разрушение) до настоящего времени различали две основные группы характеристик: а) сопротивление остаточной деформации (ползучесть); б) сопротивление полному разрушению образца (длительная жаропрочность).

Из результатов настоящей работы вытекает, что в ряде случаев целесообразно ввести третью характеристику: сопротивление начальному за-

медленному разрушению (или сопротивлению возникновению трещин длительного нагружения при повышенной температуре). Введение этой третьей характеристики оправдано уже тем, что новая оценка принципиально (т. е. качественно, а не только количественно) может располагать оцениваемые материалы иначе, чем оценка по полному разрушению образца. Поэтому, несмотря на несомненно большую методическую сложность оценки повреждаемости (по сравнению с испытанием до полного разрушения), в ряде случаев введение оценки повреждаемости окажется практически целесообразным.

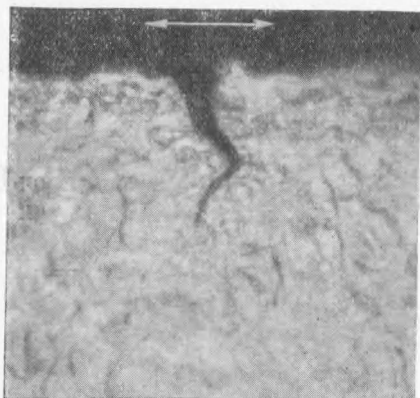


Рис. 3. Микроструктура образца из мелкозернистого сплава, отполированного до испытания. Первичная трещина после испытания длительностью 420 мин. при температуре 600°. Двусторонняя стрелка показывает направление растяжения. $\times 500$

Возможно, что оценка повреждаемости особенно полезна при наличии в службе деталей повторных резких изменений температуры, вызывающих появление циклических тепловых напряжений. Конечно, начальные трещины выявляются тем раньше, чем больше чувствительность метода их обнаружения. Поэтому определение момента возникновения «первых» трещин является в значительной мере условным. Однако при постоянстве выбранного для оценки обнаружения трещин метода сравнительная характеристика мате-

риалов может быть получена достаточно надежной.

Весьма важной является работа по дальнейшему экспериментальному уточнению действительного момента возникновения и развития ранних трещин, особенно при хрупком разрушении, при помощи современных физических (например, малоинерционных электрических⁽⁵⁾) или чувствительных дефектоскопических методов. Изучение условий возникновения начальных трещин весьма важно и с научной точки зрения, так как оно должно подчиняться более простым законам, чем развитие трещин в макрообъемах.

Поступило
30 I 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. А. Ребиндер, Юбил. сборн., посвящ. 30-летию Октябрьской Революции, М.—Л., 1947. ² Я. Б. Фридман, Т. К. Зилова, ДАН, **73**, № 4 (1950).
- ³ И. П. Щапов, В. Н. Махов, Инж. сборн., **1**, в. 1 (1941). ⁴ В. Р. Регель, Ю. Н. Недошивин, ЖТФ, **23**, в. 8 (1953). ⁵ Н. М. Dimmick, J. M. McCormick, J. Am. Cer. Soc., **34**, No. 8, 240 (1951); Glastechn. Ber., **23**, No. 1, 3, 12 (1950).
- ⁶ Я. М. Потак, Зав. лаб., № 1 (1947). ⁷ С. Т. Кишкин, ДАН, **95**, № 4 (1954).
- ⁸ Я. Б. Фридман, Механические свойства металлов, 2-е изд., 1952. ⁹ Б. А. Дроздовский, Зав. лаб., № 4—5 (1946).