

С. Т. КИШКИН

**О МЕХАНИЗМЕ РАЗУПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ СО ВРЕМЕНЕМ ПРИ ВЫСОКОЙ
ТЕМПЕРАТУРЕ**

(Представлено академиком Н. Т. Гудцовым 12 XII 1953)

В области высоких температур можно наметить три случая поведения кристаллических тел под нагрузкой (см. рис. 1):

1. С течением времени при постоянной температуре происходит разупрочнение (потеря прочности) образца или детали при упрочнении материала за счет дисперсионного твердения. Большинство промышленных сплавов на никелевой или железной основе ведет себя именно таким образом.

2. С течением времени при постоянной температуре разупрочнение образца или детали вначале сопровождается повышением прочности материала (растут твердость и предел прочности), но при значительном возрастании длительности испытания прочность материала начинает постепенно понижаться.

3. С первых часов испытания при постоянной температуре разупрочнение образца или детали происходит в условиях понижающейся прочности материала. Так ведут себя под нагрузкой сплавы на алюминиевой или магниевой основе, когда им приходится работать выше 200° .

Здесь всюду под разупрочнением образца или детали понимается понижение предела длительной прочности* с течением времени при постоянной заданной (высокой) температуре. Под прочностью материала в данном случае понимаются предел прочности или твердость, определенные при комнатной температуре после старения (отпуска) при заданной температуре и заданном времени старения, отвечающем длительности испытания образца под нагрузкой. Старение, проведенное при достаточно высоком напряжении, но не вызывающем образования трещин, не влияет на характер упрочнения или разупрочнения большинства материалов.

Самым интересным является первый случай, когда разупрочнение образца сопровождается упрочнением сплава (см. рис. 2) в результате образования мельчайших фаз, блокирующих пластическую деформацию. Становится очевидным, что падение предела длительной прочности с течением времени при испытании материала в области высоких темпера-

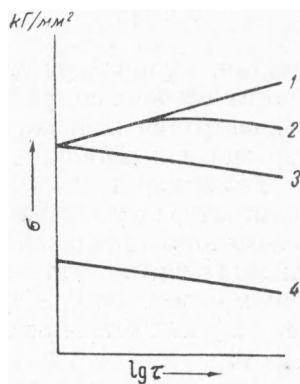


Рис. 1. Изменение H_B или σ_B (при 20°) после длительного старения при высокой постоянной температуре (кривые 1, 2 и 3) и изменение предела длительной прочности при испытании образца под нагрузкой при такой же температуре (кривая 4)

* Под пределом длительной прочности при данной (высокой) температуре понимают напряжение, приводящее к разрушению образца за определенный промежуток времени при постоянной приложенной нагрузке.

тур в данном случае нельзя связывать с процессами коагуляции или растворения упрочняющих фаз, поскольку, согласно экспериментальным данным, как внутри зерна, так и по границам зерен твердость сплава несколько возрастает за время опыта.

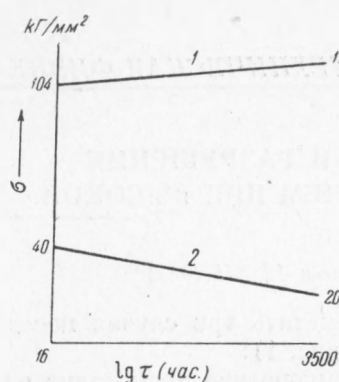


Рис. 2. 1 — упрочнение сплава ЭИ 437 (повышение σ_B при 20° после старения при 700° под напряжением 11 кг/мм^2); 2 — разупрочнение образца из этого же сплава при длительных испытаниях под большой нагрузкой при той же температуре

трещин, идущих при длительном действии статической нагрузки в очень многих случаях по границам зерен. С увеличением длины трещины растет концентрация напряжений и уменьшается площадь поперечного сечения образца или детали.

Развитию трещин при высоких температурах особенно активно способствуют легкоплавкие примеси различных веществ, залегающие по границам зерен. Этот эффект аналогичен эффекту, открытому П. А. Ребиндером.

Все процессы, способствующие хрупкости границ зерен и понижению сопротивления отрыву металла межзеренных прослоек, будут усиливать разупрочнение образцов и деталей под напряжением. В сущности, этот процесс разупрочнения представляет собой процесс разрушения, развивающийся иногда очень длительное время, если напряжения не очень высоки, но достаточны для возбуждения и развития трещин.

Примером сплава, работающего в зоне (Б), может быть сплав ЭИ 437, если его испытывать при 800° . У этого сплава, предварительно состаренного при 700° (16 час.), обычно уже через 30 мин. выдержки при 800° в основном заканчивается процесс коагуляции или растворения упрочняющих частиц, и его твердость в результате этого понижается с 290 до 275—280 единиц по Бринеллю, почти не меняясь при более длительном испытании. Между тем, через несколько часов при этой температуре под напряжением всего лишь в 20 кг/мм^2 с поверхности образца образуются

В практике для высоконагруженных деталей применяют сплавы, склонные к дисперсионному твердению (старению).

Сплавы, работающие в температурной зоне (А) до максимума на кривой старения, характеризуются разупрочнением образца или детали (понижением предела длительности прочности с увеличением срока испытания) и такими структурными изменениями, которые повышают твердость или предел прочности сплава после соответствующего старения. Температурная зона (Б) за максимумом на кривой старения охватывает такие случаи, когда разупрочнение образца или детали сопровождается разупрочнением сплава: его твердость понижается.

Есть основания утверждать, что основным механизмом разупрочнения образца или детали, изготовленных из большинства промышленных сплавов, работающих в зоне (А), и многих сплавов (в частности, на никелевой основе), работающих в зоне (Б), является механизм образования и развития

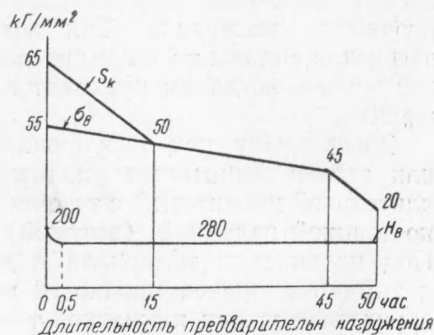


Рис. 3. Понижение сопротивления разрушению при 800° сплава ЭИ 437 в зависимости от длительности предварительного нагружения под напряжением 20 кг/мм^2 (С. Т. Кишкин и А. А. Клыпин)

идущие вглубь металла трещины. Если такой образец довести до разрушения (при 800°), то сопротивление разрушению оказывается заниженным, и оно тем ниже, чем больше была предварительная выдержка под напряжением, равным 20 кг/мм^2 (см. рис. 3). Через 15 час. сопротивление разрушению падает от 65 до 50 кг/мм^2 , а через 50 час. образец разрушается под напряжением, равным 20 кг/мм^2 , в результате образования и развития трещин под этим напряжением.

У очень многих сплавов трещины возникают в начале второго периода ползучести (рис. 4). Поэтому процесс ползучести таких сплавов протекает уже во втором периоде не при постоянном, а при переменном напряжении*.

Механизм разупрочнения путем образования и развития трещин, по-видимому, представляет собой основной механизм истощения прочности металлов и сплавов с течением времени при самых разнообразных способах их нагружения и различных условиях эксплуатации. Характерно, что и хрупкое разрушение материалов при комнатной температуре, и усталостное разрушение (по зерну при любых температурах), и статическое разрушение при длительном действии нагрузки в области высоких температур (в большинстве случаев по границам зерен), и ряд других случаев разрушения внешне описываются одинаковым образом: в определенном интервале времени (в логарифмическом масштабе) прочность падает по закону прямой, пока напряжение не достигнет у кристаллических тел определенного критического значения (отвечающего определенной упругой деформации), характерного для выбранной среды испытания. В дальнейшем при увеличении длительности нагружения трещины не возбуждаются и прочность не зависит от времени испытания. Не исключена возможность, что у хрупких аморфных тел, а также у некоторых металлов, нет ясно выраженного критического напряжения, и с увеличением длительности испытания при наличии достаточно активной внешней среды (в ряде случаев, влаги) с увеличением длительности испытания прочность будет непрерывно понижаться.

Специфика разрушения сплавов по зерну, а не по границам зерен, что имеет, например, место при развитии трещины из сдвига в случае испытания на усталость, приводит к тому, что трещина по времени возникает значительно позже. В этом случае сплав работает 80—85% времени до разрушения без трещин, в то время как под действием статической нагрузки в области высоких температур материал работает без трещин часто всего лишь 10—20% времени до разрушения. В связи с этим проблема упрочнения границ зерен жаропрочных сплавов становится одной из центральных проблем металлургии.

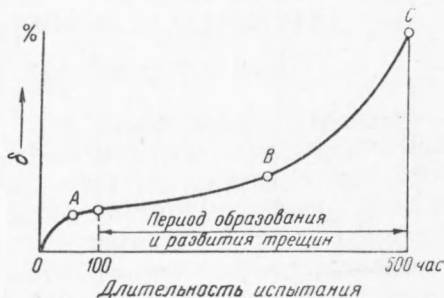


Рис. 4. Развитие трещин сплава типа ЭИ 437 в процессе ползучести при постоянной температуре (700°) и среднем напряжении 30 кг/мм^2

Поступило
12 XII 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ D. Hanson, M. A. Wheeler, J. Inst of Metals, 45, No. 1, 229 (1931).
² Flight, 54, No. 2074, 383 (1948). ³ Я. М. Потак, Зав. лаб., № 1, 77 (1947).
⁴ С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев, ЖТФ, 23, в. 10 (1953). ⁵ Я. Б. Фридман, Б. А. Дроздовский, ДАН, 95, № 4 (1954).

* Это подтверждает необходимость построения наряду с кривыми длительной прочности при длительных статических нагрузках также и кривых повреждаемости, что было проведено в недавней работе Я. Б. Фридмана и Б. А. Дроздовского (⁵).