Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 1

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР И. А. ОДИНГ и В. С. ИВАНОВА

О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

В ряде исследований показано, что разрушение металлов при ползучести вызывается образованием и ростом трещин.

Хансон и Уиллер ([1]) путем измерения электропроводности и удельного веса показали, что процесс развития трещин начинается на третьем участке кривой ползучести. С. Т. Кишкин ([2]) отметил, что процесс трещинообразования может начинаться ранее — в начале второго участка кривой ползучести.

Принимая во внимание, что снижение предела длительной прочности является необратимым процессом и что даже сравнительно непродолжительное пребывание металла в условиях ползучести влечет за собой снижение длительной прочности при последующей его службе в условиях высокой температуры, следует придти к заключению, что процесс трещинообразования начинается еще раньше — на первом участке кривой ползучести и имеет свой необратимый подготовительный период, при котором зародыши трещин пока еще не могут быть выявлены современными методами исследования.

Гринвуд ([3]), а затем Крюссар ([4]) объясняли появление и развитие микротрещин скоплением вакантных мест кристаллической решетки в колонии. Однако в этих работах осталось невыясненным, почему микротрещины растут в направлении, перпендикулярном растягивающим напряжениям, как это установлено микроанализом.

Привлекая для описания механизма разрушения металлов при ползучести также гипотезу вакантных мест, получившую сейчас большое признание при построении теории диффузии, необходимо прежде всего постулировать следующие положения:

1) Вакантные места должны перемещаться из объемов, сильно упруго растянутых, в объемы, менее растянутые, или в объемы, упруго сжатые. Это обстоятельство диктуется термодинамическими соображениями. Такими объемами могут быть не только макроскопические, но и микро- и ультрамикроскопические. Последними являются те силовые поля, которые окружают каждую дислокацию. В сжатой области этого силового поля будут скапливаться вакансии.

2) Имеющееся количество вакансий в металле недостаточно для массового трещинообразования. Возникновение новых вакансий в процессе службы металла вызывается пластической деформацией — образованием и движением дислокаций. Последние при встрече с препятствием или при выходе из плоскости скольжения могут образовывать в массовом количестве вакантные места ([5]). Это положение имеет весьма важное следствие: без пластической деформации, хотя бы локальной, невозможно себе представить разрушение металлов при их длительной службе под нагрузкой в условиях высокой температуры.

3) Зародышами трещин являются или микропоры в металлах, благоприятно ориентированные для перерождения в трещины, или скопле-

ние вакансий в объемы такой величины, что их можно рассматривать уже как микропоры. Наличие микропор в металле, равно как и их развитие при пластической деформации было показано методом вдавливания окрашенной жидкостью ([6]), дилатометрическим ([7]) и рентгеноструктурным ([8]) анализами. Диффузия вакансий может иметь место до тех пор, пока вакансия не переместится на поверхность поры или на наружную поверхность образца. Здесь вакансии задерживаются и начинается их накопление.

Используя эти три положения, можно развить следующее представление о росте трещин.

Если металл подвергнуть растягивающему напряжению σ, то у края микропоры, расположенной так, что ее большая ось перпендикулярна к направлению действия напряжения, создается концентрация напряжения, схематически изображенная на рис. 1.

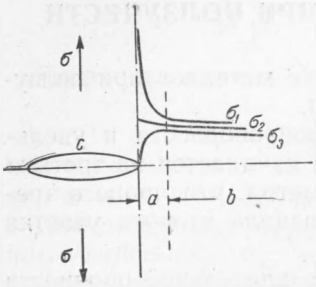


Рис. 1. Распределение напряжения у основания трещины

Область *a* будет сильно растянутой, область *b* растянута слабо, а область *c* будет сжата. Между *a* и *c* напряжение меняет свой знак от растяжения до сжатия. Наибольшая пластическая деформация будет иметь место в области *a*, где напряжения растяжения наибольшие. Здесь образование и движение дислокаций будет наиболее эффективным. Следовательно, в этой области будут наиболее интенсивно образовываться и вакансии. Последние, в соответствии с первым положением, изложенным выше, будут диффундировать в сжатую область *c* и менее растянутую область *b*. Приток вакансий в область *c* создаст благоприятные условия для округления поры. Приток вакансий в область *b* вызовет их скопление в местах, граничащих с областью *a*, так как градиент напряжения в области *b* невелик, что уменьшает возможность передвижения вакансий вглубь области *b*. Кроме того, если скорость образования вакансий в области *a* будет превышать скорость их ухода в области *c* и *b*, то неизбежно и в области *a* будет иметь место накапливание вакансий. Превышение же скорости образования вакансий вполне возможно, ибо акт пластической деформации в локальном объеме совершается за короткий промежуток времени, в течение которого заметной диффузии вакансий ожидать трудно. Накопление вакансий в пограничной области между *a* и *b* и в области *a* следует рассматривать как рост трещины в направлении, перпендикулярном действию растягивающих напряжений, и как процесс, эффективно снижающий прочность металла в районе основания трещины.

Такой механизм разрушения можно видеть и при наличии макроскопического надреза. Наблюдения над образцами с надрезом, испытанными на длительную прочность, показывают, что трещины образуются или на поверхности надреза (область *a*) или на некотором расстоянии от поверхности дна надреза (пограничная область между *a* и *b*).

Возникает вопрос: почему же трещины в одних случаях появляются в теле зерна (транскристаллические трещины), а в других — на границах зерен (интеркристаллические трещины).

Интеркристаллическое разрушение в процессе ползучести наблюдается тогда, когда напряжения относительно невелики и вызывают небольшие скорости ползучести и большое время до разрушения. В этих условиях деформация накапливается главным образом за счет перемещения зерен, т. е. за счет межзеренной пластичности. Естественно, что образование и скопление вакансий, а в конечном результате и образование трещин должно происходить по границам зерен. Далее, выполнение вторичных фаз из твердого раствора чаще всего происходит на грани-

цах зерен. В тот период, когда размеры этих сегрегатов еще малы, они способствуют пересечению дислокаций при огибании препятствия, что влечет за собой интенсивное образование вакансий ([5]). Это опять будет способствовать образованию трещин на границах зерен.

Наряду с межзеренной пластичностью в указанных условиях будет иметь место и сдвигово-дислокационная пластичность в самих зернах. Однако при малых напряжениях в теле зерна может образовываться лишь небольшое число источников, критическое напряжение которых $\tau_{кр} = Gb/l$ также невелико ([10]) (здесь G — модуль сдвига, b — вектор Бюргерса и l — длина дислокации). Эти дислокации, передвигаясь к границам зерен, увлекают с собой и вакансии, скопившиеся в сжатой части силового поля, окружающего каждую дислокацию.

Следовательно, и этот механизм, названный Лейбфридом и Хазеном ([9]) гомогенным сдвигом, будет способствовать скоплению вакансий и образованию трещин на границах зерен.

Интересно отметить, что Холомон ([10]) показал, что если источник дислокаций закреплен лишь одним концом, а второй его конец выходит на поверхность образца, то критическое напряжение $\tau_{кр}$, необходимое для образования этих источников дислокации, может уменьшиться до двух раз. Это обстоятельство объясняет, почему при испытании металла на длительную прочность трещины образуются в первую очередь на поверхности образца — здесь все события, приводящие к трещинообразованию, протекают с опережением тех же процессов собирания вакансий, которые протекают в нижележащих слоях, из-за меньшей величины того критического напряжения, заставляющего генерировать источники дислокаций. Кроме того, выход вакансий на поверхность образца должен привести к ее закреплению, так же как выход вакансий на поверхность трещины или поры.

Иначе складываются условия для образования трещин, если ползучесть протекает с относительно большой скоростью и при высоких напряжениях. В этих случаях время до разрушения сильно сокращается и доля межзеренной пластичности в общей величине пластической деформации также сильно уменьшается. При этом большую эффективность приобретает дислокационно-сдвиговый механизм, развивающийся в теле зерна. Высокие номинальные напряжения приводят в действие большое число источников дислокаций как с малой, так и с большой величиной критического напряжения τ. В этом случае сдвиги не будут сосредоточиваться в небольших локальных объемах, как это имело место при гомогенном сдвиге. Наоборот, большое число одновременно действующих источников дислокаций вызовет сдвиги в относительно больших по размерам плоскостях, видимых в микроскоп, а иногда и невооруженным глазом в виде так называемых линий скольжения. Образовавшиеся линии скольжения будут играть ту же роль, что и границы зерен, в отношении скапливания вакансий и образования трещин. И если эти процессы по линиям скольжения будут протекать с опережением по сравнению с границами зерен, то наибольшее трещинообразование будет иметь место в теле зерна, и разрушение будет носить транскристаллический характер — по плоскостям скольжения, как это и наблюдается в действительности.

Таким образом, интеркристаллическое и транскристаллическое разрушение металлов при ползучести вызывается одними и теми же процессами: диффузией вакантных мест, собиранием этих вакансий в колонии или к порам, развитием пор в трещину и, наконец, ростом этой трещины за счет притока новых вакансий.

Конечно, кроме этого основного механизма снижения длительной прочности необходимо еще считаться и с сопутствующими явлениями: обеднением твердого раствора легирующими примесями, структурными изменениями, окислением поверхности газами и т. д. Однако эффектив-

ность последних процессов в снижении длительной прочности по сравнению с трещинообразованием следует признать второстепенной.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР

Поступило
25 II 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] D. Hanson, A. Wheeler, J. Inst. Met., **45**, № 1, 229 (1931). [2] С. Т. Кишкин, ДАН, **95**, № 4 (1954). [3] J. N. Greenwood, J. Iron and Steel Inst., **171**, 380 (1952). [4] C. Crussard, J. Friedel, Symposium on Creep and Fracture of Metals at High Temperatures, 31st may, 1st and 2nd June, 1954. [5] F. Seitz, Advances in Physics, **1**, No. 1 (1952). [6] G. Tammann, H. Bedemeier, Zs. anorg. u. allg. Chem., **142**, 54 (1925). [7] Y. Blin, C. R., **237**, (1953). [8] Y. Blin, A. Junier, C. R., **236** (1953). [9] G. Leibfried, P. Haasen, Zs. f. Phys., **137**, 67 (1954). [10] J. H. Hollomon, Report of 9th Solway Congr., 1952.