

УДК 621.785.3: 546.62.

ПОРИСТОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

© В.И. Бетехтин

Россия, Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Betekhtin V.I. Porosity and mechanical properties of solids. This paper is concerned with deformational (metal, alloy, polymer) and partial technological (amorphous alloy, cement) porosity. Formation and accumulation of porosity normally leads to deterioration of physical and mechanical properties of materials, and the reverse process associated with regeneration of continuity by, for instance, a partial or full healing of porosity is usually accompanied by an enhancement (or restoration) of these properties.

Микроскопические поры и трещины (в дальнейшем - пористость) являются характерными трехмерными дефектами для широкого круга твердых тел [1]. При классификации пористости полезно выделить два ее основных типа - приобретенную и врожденную. Первый тип - это пористость, которая образуется в процессе пластической деформации материалов при статическом или циклическом нагружении, ползучести, механической полировке и т. д. К первому типу пористости относится также пористость, которая образуется в материалах вследствие интенсивных воздействий (радиационных, лазерных), при наводороживании, коррозии и т. д.

Второй тип пористости - врожденная. Такая пористость имеет место во всех типах керамик; в цементе и бетоне; в аморфных, порошковых и закаленных сплавах; в электролитических и напыленных пленках. Минимальные размеры врожденной пористости лежат в пределах от десятых долей до нескольких десятков процентов.

Образование пористости ведет, как правило, к ухудшению физико-механических свойств материалов, а уменьшение пористости (например, за счет ее заживления), то есть регенерация сплошности, позволяет повысить эти свойства.

Технология регенерации сплошности включает воздействие на пористость высоких температур и давлений (гидростатических, динамических, МГД). Используются также поверхностные обработки (пневмодинамический наклеп, имплантация и др.).

В зависимости от параметров пористости (их размеров, формы, распределения в объеме материала), которые задаются условиями получения, эксплуатации материалов (изделий) или их свойствами, механизмы заживления пористости и, как следствие, регенерационные технологии, дающие максимальный положительный эффект повышения свойств, могут существенно отличаться.

При выборе оптимальных технологий необходимо учитывать следующие факторы:

1. Пористость локализуется преимущественно на поверхности изделий (статическое нагружение материалов, находящихся в квазихрупком состоянии; циклическое нагружение). В этом случае наиболее эффек-

тивным является либо поверхностная обработка (например, пневматический наклеп), либо удаление определенного по толщине поверхностного слоя [2]. Залечивание вышедших на поверхность микронесплошностей за счет нагрева изделий малоэффективно, так как идет при очень высоких $T \approx 0,9 T_{пл}$, при которых происходят обычно разупрочняющие структурные изменения.

2. Пористость локализуется в основном в тонких (десятки микрон) приповерхностных слоях материалов (статическое нагружение в области умеренных температур, механическая полировка). Разрушение вблизи поверхности (но не выходящее на поверхность) микропоры с ювенильными берегами залечиваются при невысоких температурах нагрева, которые не вызывают разупрочнения из-за дополнительных структурных перестроек (развала блочной, дислокационной структуры, рекристаллизации, изменения фазового состава). Для кристаллических материалов, для которых растворение пористости осуществляется механизмом трубчатой диффузии вакансий по ядрам дислокаций на естественный сток - поверхность, залечивание происходит уже при $T \approx 0,45 T_{пл}$ [3]. Процесс залечивания интенсифицируется при действии в процессе отжига растягивающей нагрузки $\sigma = 0,9\sigma_x$, где σ_x - предел текучести материала.

3. Пористость относительно равномерно распределена по всему объему материала, локализуясь обычно на границах зерен, блоков, частиц второй фазы (в сплавах). Последнее имеет место при эксплуатации материалов при повышенных температурах $T > 1/2 T_{пл}$ (высокотемпературная ползучесть); при интенсивных воздействиях; в материалах с врожденной пористостью. В этом случае улучшение свойств за счет залечивания пористости эффективнее происходит при воздействии высоких гидростатических или импульсных давлений. Залечивание пористости под давлением происходит дислокационным механизмом (кристаллические тела) или механизмом вязкого течения (аморфные тела); температурное залечивание «объемной» пористости идет при $T \approx 0,65 T_{пл}$ и реализуется либо вакансионным механизмом с энергией, равной энергии самодиффузии (кристаллы), либо вязким течением (аморфные материалы) [1, 4 - 6]. При высокотемпературном отжиге следует учитывать, однако, возможные

побочные разупрочняющие структурные изменения, которые могут нивелировать упрочнение за счет залечивания пористости. Следует также учитывать состояние поверхности пор, в частности, наличие там примесей. Некоторые из которых могут способствовать, а некоторые – затруднять вакансионное растворение пор.

4. При разработке оптимальных технологий следует иметь в виду, что поры с размерами порядка микрон и менее эффективнее залечивать за счет отжига, а более крупные поры (особенно трещины) за счет обработки давлением. Эффективная технология уменьшения пористости должна учитывать все отмеченные выше факторы и, в принципе, может включать несколько видов обработок, выполненных в определенной последовательности (например, снятие поврежденного слоя, низкотемпературный отжиг, воздействие давлением).

Отметим некоторые примеры улучшения свойств за счет уменьшения поверхностной, приповерхностной, объемной (приобретенной или врожденной) пористости.

Так, в случае испытания в режиме малоциклового усталости (сталь 30ХГСН2А), при котором микронесплошности накапливаются в основном на поверхности, пневмодинамический наклеп или удаление поврежденного поверхностного слоя для образцов, выработавших около 30 % своего ресурса, позволяет увеличить время до разрушения до двух раз [2].

При испытании на ползучесть в области умеренных температур (Al, Ti, САП-1, Ag), когда микронесплошности локализируются преимущественно в тонких приповерхностных слоях, промежуточный залечивающий отжиг (включая отжиг под нагрузкой) при $1/2T$ для образцов, выработавших около 50 % своего ресурса, увеличивает долговечность в несколько раз [3].

Систематические исследования влияния залечивания пористости за счет действия гидростатического давления от 4 до 15 кбар были проведены на металлах (Cu, Ni) и некоторых сплавах, которые испытывались в режиме высокотемпературной ползучести при $T \geq 1/2T_{пл}$, когда зернограничная пористость образовывалась во всем объеме испытываемых образцов. Установлено, что для образцов, выработавших от 50 до 70 % своего ресурса, наложение давления ведет к существенному уменьшению пористости (при этом наиболее интенсивно залечиваются более крупные поры и их конгломераты) и, как следствие, к повышению долговечности [4, 8]. Многократная промежуточная залечивающая обработка давлением ведет к росту долговечности более чем на порядок.

Уменьшение объемной пористости, образовавшейся в процессе высокотемпературной ползучести (Al, Zn) или наводороживания (Fe) за счет воздействия высокого гидростатического давления ведет к существенному росту модуля упругости [9]. Особенно эффективно уменьшает объемную пористость металлов и литых сплавов воздействие динамического или МГД давления [10, 11].

В заключение рассмотрим некоторые примеры влияния залечивания объемной пористости на свойства цементного камня, аморфных сплавов, полимеров.

Известно, что сформировавшийся цементный камень имеет высокую пористость ≈ 28 %. Было показано, что наложение гидростатического давления на за-

твердевший по стандартной технологии цементный камень ведет к существенному уменьшению его пористости и пропорциональному росту прочности, микротвердости, упругого модуля [12].

Для ряда аморфных сплавов было показано, что воздействие гидростатического давления ведет к уменьшению свободного избыточного объема, связанного с наличием микропор с размерами ≈ 10 нм и, как следствие, к повышению прочности, микротвердости и температуры вязкохрупкого перехода [13].

Уменьшение концентрации микронесплошностей ведет также к существенному повышению прочности полимерных материалов. Было показано, что концентрация микропор в полиэтилене высокой плотности, растянутом при 1 и 1500 атм., соответственно равна $8 \cdot 10^{14}$ и $1,7 \cdot 10^{12}$ см⁻³ (размеры микропор ≈ 100 нм). Разрывная прочность образцов оказалась при этом $22,7 \pm 1,4$ и $31,4 \pm 1,1$ кг/см², соответственно [14].

Таким образом, для широкого круга материалов уменьшение их приобретенной или врожденной пористости ведет к существенному повышению механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 373 с.
2. Бетехтин В.И., Шмидт Ф. И др. Особенности разрушения и пути повышения долговечности сплавов // Структура, механические свойства и разрушение материалов: Сб. Киев: ИПМ, 1988. С. 121-128.
3. Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. Микротрещины в приповерхностных слоях деформированных кристаллов // Поверхность, физика, химия, механика. 1984. Т. 7. С. 144-151.
4. Бетехтин В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. Влияние гидростатического давления на залечивание микропор и высокотемпературную ползучесть // ФММ. 1990. Т. 5. С. 176-184.
5. Петров А.И., Разуваева М.В., Синани А.Б., Бетехтин В.И. Отжиг растянутых аморфно-кристаллических полимеров с микронесплошностями // Механика композиционных материалов. 1990. Т. 2. С. 273-278.
6. Петров А.И., Разуваева М.В., Синани А.Б., Бетехтин В.И. Влияние всестороннего давления на залечивание микропор в политетрафторэтилене // Механика композиционных материалов. 1989. Т. 6. С. 1121-1125.
7. Бетехтин В.И., Петров А.И. и др. Залечивание микропор под действием гидростатического давления и упрочнение металлов // ФММ. 1989. Т. 67. № 2. С. 318-322.
8. Sklenicka V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G. Strinkage of creep cavities by application of high hydrostatic pressure // Scripta Met. 1991. V. 25. P. 2159-2164.
9. Бетехтин В.И., Петров А.И. и др. Влияние пористости на эффективный модуль упругости металлов // ФММ. 1990. Т. 67. С. 564-569.
10. Фрисова В.Г., Бетехтин В.И., Паишков П.О. и др. Особенности воздействия ударно-волнового нагружения на пористость литых сплавов. Волгоград: ВПИ, 1989. С. 97-104.
11. Бетехтин В.И., Перегуд В.П. и др. Особенности импульсного МГД-воздействия на микронесплошности в меди // ЖТФ. 1989. Т. 6. С. 136-139.
12. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. и др. Влияние гидростатического давления на структуру и свойства цемента // Цемент. 1991. Т. 5-6. С. 16-20.
13. Бетехтин В.И., Глезер А.М., Кадомцев А.Г., Кияткова А.Ю. Избыточный свободный объем и механические свойства аморфных сплавов // ФТТ. 1998. Т. 40. № 1. С. 85-92.
14. Айнбиндер С.Б., Бетехтин В.И. и др. Влияние гидростатического давления на образование субмикротрещин и прочность полиэтилена // Механика полимеров. 1977. Т. 4. С. 742-745.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 97-02-17412.