

05;12

Влияние статического и динамического сжатия на залечивание пор в меди

© А.И. Петров, М.В. Разуваева, А.Б. Синани, В.В. Никитин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 28 июля 1997 г.)

Изучены особенности залечивания пор в меди (исходная пористость 12%) при различных видах статического и ударно-волнового нагружения. Показано, что процесс залечивания в случае статического нагружения определяется величиной максимальных сдвиговых напряжений, возникающих на поверхности поры, и характером распределения этих напряжений вблизи поры. Наблюдаемое возрастание эффективности залечивания пористости при динамических способах сжатия по сравнению со статическими связывается с увеличением температуры локального разогрева вблизи пор.

Известно [1], что залечивание пор в кристаллических материалах в условиях давления при обычных температурах происходит по дислокационному механизму. Согласно [1], вблизи поры под давлением возникают сдвиговые напряжения. При достижении напряжения, превышающего критическое напряжение срабатывания источника Франка–Рида вблизи поры, формируется дислокационная петля и происходит смещение границы поры на величину вектора Бюргерса. Степень залечивания поры определяется количеством испущенных ею дислокационных петель, которое зависит от подвижности дислокаций, величины и времени действия напряжения. Можно поэтому ожидать, что процесс залечивания будет определяться величиной максимальных сдвиговых напряжений τ_{\max} на поверхности поры, характером распределения напряжений τ вблизи поры, а также временем действия давления. В этой связи представляет интерес изучение кинетики залечивания пор при различных видах динамического и статического сжатия, отличающихся указанными параметрами. Такая задача и была поставлена в данной работе.

Исследование проводили на пористой меди. Образцы в форме дисков диаметром 18 mm и толщиной $h = 1$ mm получали выпариванием цинка из латуни (Cu + 26%Zn) в вакууме при температуре 800°C в течение 8 h. Исходная степень пористости $W_0 = (\rho_0 - \rho) / \rho_0$, где ρ_0 — табличная плотность меди, ρ — плотность выпаренных образцов, составляла около 12%. Средний размер пор 25 μm . Статические воздействия осуществляли в условиях всестороннего давления, при одноосном сжатии и в условиях одноосного сжатия с зажатой боковой поверхностью. Динамическое сжатие образцов меди осуществляли ударно-волновым нагружением диска, помещенного в обойму для предотвращения поперечного растекания материала. Длительность импульса сжатия при разных амплитудах сжатия P в плоской ударной волне составляла 6–8 μs . Детальное описание методики проведения ударного нагружения дано в работе [2]. Контроль пористости W до и после различных воздействий осуществляли измерением плотности и с помощью оптической микроскопии (Neophot-30).

На рис. 1 приведены кривые изменения W в условиях статического (1) и динамического (2) сжатия. Видно, что во всех условиях величина порогового давления P^* не зависит от вида сжатия и составляет ≈ 100 МПа. Это означает, что и величина критического напряжения, при достижении которого начинается процесс залечивания, также одинакова в случае статического и динамического сжатия. Однако при давлениях, больших порогового ($P > P^*$), ударное сжатие приводит к большей степени залечивания, чем статическое.

Наблюдаемое увеличение эффективности динамического сжатия по сравнению со статическим может быть связано с увеличением пластичности за счет роста температуры. Известно [3], что прохождение ударной волны вызывает различные тепловые эффекты, причем на внутренних поверхностях раздела, таких как поры,

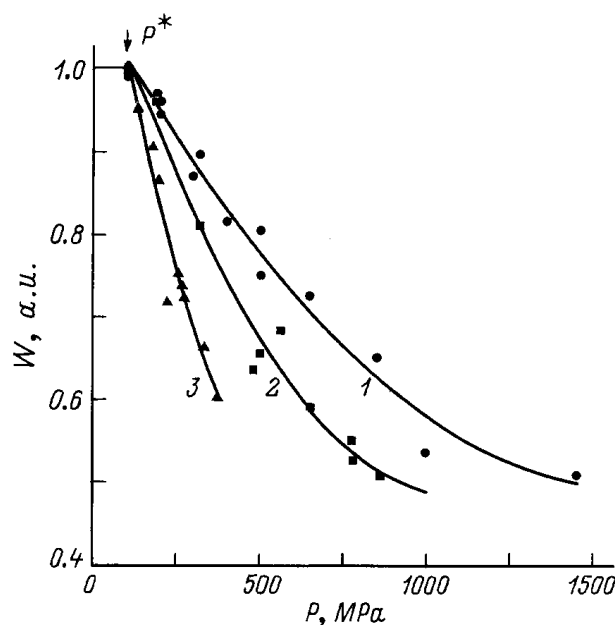


Рис. 1. Относительная величина пористости меди после воздействия статического (1), ударного (2) и импульсного магнитного (3) сжатия. За "1" принято $W_0 = 0.12$.

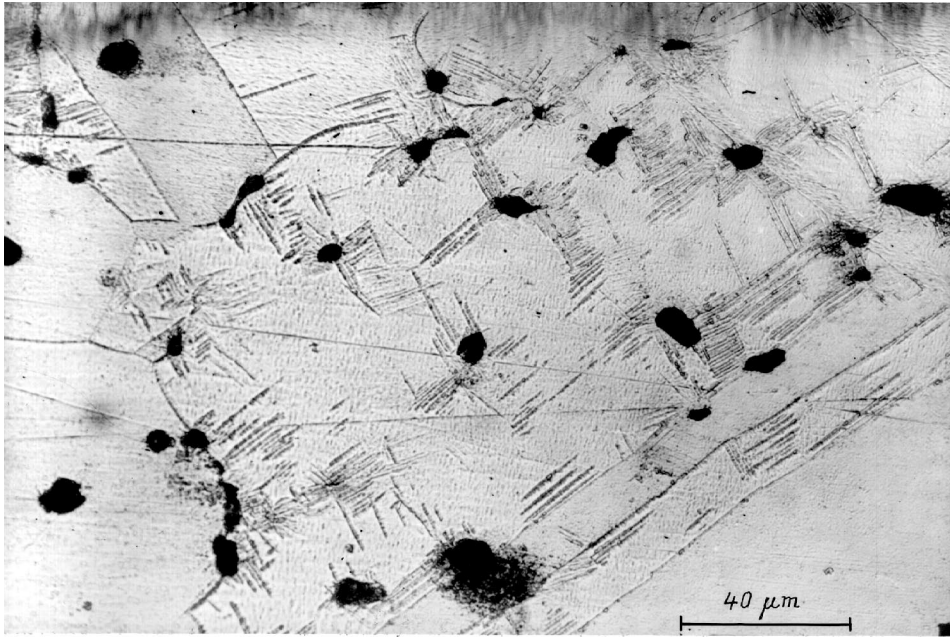


Рис. 2. Оптическая фотография шлифта пористой меди после воздействия ударного давления $P = 2000$ МПа. Увеличение 640.

могут возникнуть микрокумулятивные явления [4], сопровождающиеся значительным дополнительным разогревом.

Другая причина повышения подвижности дислокаций при динамическом нагружении может быть связана с локальными разогревами в полосах скольжения за счет адиабатических процессов при движении дислокаций с большими скоростями. Следствием этих процессов является локализация пластической деформации в полосах сдвига либо в адиабатических полосах сдвига [3]. Металлографический анализ шлифов меди, подвергнутой динамическому сжатию, показал высокую степень локализации пластической деформации вблизи пор. Уменьшение размера пор сопровождается образованием у пор сдвиговых полос (рис. 2), длина которых возрастает с ростом амплитуды сжатия в ударной волне. При статическом сжатии такие полосы не наблюдаются, что указывает на то, что пластическая деформация в этих условиях проходит гомогенно.

Проведем сравнение влияния на пористость меди воздействия импульсов сжатия различной длительности. В работе [5] исследовали особенности воздействия импульсного магнитного давления различной амплитуды и одинаковой длительностью импульса сжатия $t \approx 2 \mu\text{s}$. На рис. 1 по данным [5] представлена зависимость пористости от величины магнитного давления в диапазоне от 0 до 350 МПа. Сравнение кривых 2 и 3 показывает, что степень залечивания при динамическом воздействии тем выше, чем меньше длительность импульсов сжатия. Полученный результат противоречит положениям работы [1], согласно которым уменьшение времени действия давления должно приводит к уменьшению эффекта залечивания.

Можно полагать, что основная причина увеличения эффекта залечивания с уменьшением длительности импульса связана в первую очередь с возрастанием крутизны переднего фронта волны сжатия, поскольку это приводит к росту скорости деформирования, усилению адиабатических эффектов, локальных разогревов. Кроме того, при укорочении времени залечивания поры поле напряжений вокруг поры меньше ослабляется волнами разгрузки, приходящими от пор окружения. Эти волны могут играть главную роль в остановке процесса залечивания.

Рассмотрим данные по влиянию вида напряженного состояния на залечивание пор. На рис. 3 приведены зависимости W от P при различных способах статического сжатия, отличающихся величиной τ_{max} и характером спада τ от поры в глубь материала. В случае всестороннего сжатия (*I*) $\tau_{\text{max}} = 0.75P$, напряжения являются короткодействующими, так как спадают с увеличением расстояния от поры как $1/r^3$ [1], где r — расстояние от ее центра. В случае одноосного сжатия (*II*) и в условиях одноосного сжатия с зажатой боковой поверхностью (*III*) возникают далекодействующие напряжения, при это величина τ_{max} равна соответственно $0.7P$ и $0.3P$ [6]. Следовательно, наблюдаемые на рис. 3 различия связаны как с величиной τ_{max} , так и с распределением напряжений вблизи пор. Действительно, сравнение *I* и *II* показывает, что величина τ_{max} в этих случаях одинакова, но сдвиговые напряжения различаются далекодействием. Вследствие этого количество испущенных порами дислокаций в сжатом диске определяется только наличием в материале стопоров для движения дислокаций, в то время как в условиях давления — встречными напряжениями от испущенных порами дислокаций [1]. При

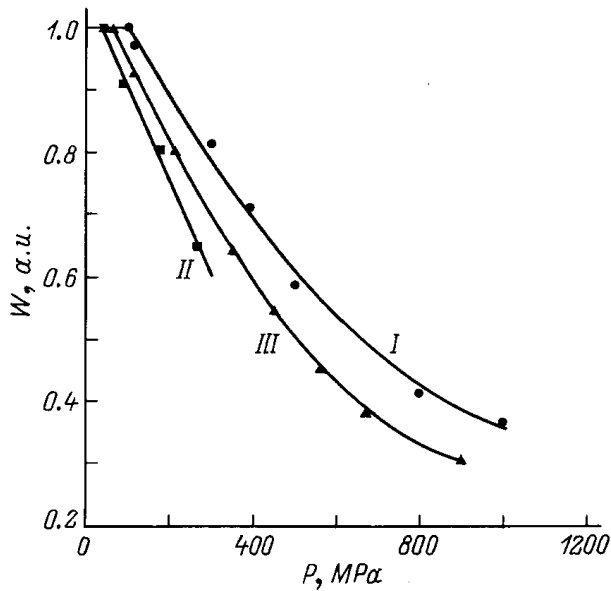


Рис. 3. Относительная средняя пористость меди после воздействия всестороннего (I), одноосного с зажатой боковой поверхностью (II) и одноосного в свободном состоянии (III).

различных способах одноосного сжатия разная степень залечивания определяется величиной τ_{\max} (кривые II и III на рис. 3).

Различие в напряженном состоянии при разных способах сжатия определяет не только разную степень залечивания, но и величину порогового давления P^* (рис. 3), а также деформацию $\varepsilon = \Delta h/h$, сопровождающую процесс залечивания. Установлено, что в случае всестороннего сжатия и сжатия с зажатой боковой поверхностью выполняются известные соотношения $\varepsilon = 1/3\varepsilon_v$ и $\varepsilon = \varepsilon_v$, где $\varepsilon_v = (W_0 - W)$ — объемная деформация, обусловленная залечиванием пористости. В случае одноосного сжатия в свободном состоянии $\varepsilon \approx 5\varepsilon_v$.

Таким образом, степень залечивания пористости в меди в условиях сжатия определяется величиной максимальных сдвиговых напряжений, характером распределения напряжений вблизи пор, а при ударно-волновом нагружении — длительностью импульса сжатия. Возрастание эффективности залечивания пористости при динамических способах сжатия по сравнению со статическими связана, вероятно, с увеличением температуры локального разогрева, а не с изменением напряженного состояния вблизи пор.

Работа по ударно-волновому нагружению поддержана грантом РФФИ № 96-01-01207а.

Список литературы

- [1] Гегузин Я.Е., Кононенко В.Г. // Физика и химия обработки материалов. 1982. № 2. С. 60–75.
- [2] Златин Н.А., Монаков С.М., Пугачев Г.С. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 3. С. 681–682.
- [3] Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. М.: Металлургия, 1984. 512 с.
- [4] Зильбербранд Е.Л., Пугачев Г.С., Синани А.Б. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 6. С. 45–49.
- [5] Бетехтин В.И., Пахомов А.Б., Перегуд Б.П. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 136–139.
- [6] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.