

УДК 669.017; 539.4; 539.52

В. Ю. Карпов, С. И. Губенко, В. В. Карпов

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГАЗАРОВ

ГУБЕНКО Светлана Ивановна — доктор технических наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, г. Днепр-5, пр. Гагарина, 4, e-mail: sigubenko@gmail.com; **КАРПОВ Владимир Юрьевич** — доктор технических наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, г. Днепр-5, пр. Гагарина, 4.; **КАРПОВ Вячеслав Владимирович** — кандидат технических наук, заведующий НИЛ «Сплав», Национальная металлургическая академия Украины, 49600, г. Днепр-5, пр. Гагарина, 4.

Определено, что механические свойства газаров зависят от степени и метода их деформации, изменения пористой структуры. Установлено, что при прокатке изменение прочностных свойств газаров происходит более интенсивно чем при волочении на 25 – 40%. Показано, что поверхностные пористые слои газаров интенсивно деформируются, становятся практически монолитными и получают высокий уровень наклепа, что резко увеличивает их прочность. Доказано, что деформированные, но не отожженные образцы имеют прочность в 2 ... 3 раза выше чем монолитные образцы тех же размеров. После отжига прочность газаров выше в 1,5 ... 2 раза. Рассмотрен процесс изменения структуры газаров после отжига для снятия внутренних напряжений. Предложены возможные механизмы изменения пористой структуры газаров и увеличения их прочности.

Ключевые слова: прокатка, волочение, газары, деформация, поры, наклеп.

ВВЕДЕНИЕ

Пористые материалы – газары недостаточно изучены с точки зрения изменения их структуры и свойств после пластической деформации. В то же время для нужд промышленности требуется разработать методы управления структурообразованием газаров при различных обработках, в частности, для снижения размеров пор, что позволит влиять на их свойства. При традиционной технологии изготовления газаров можно получить однородную структуру с порами диаметром 10 ... 15 мкм при пористости 25 ... 30% [1 - 3]. Получение равномерных пор меньшего диаметра в больших объемах производства, не применяя пластическую деформацию, значительно сложнее. Только используя пластическую деформацию можно достаточно легко изменять как размер пор, так и механические свойства газаров. Целью исследования было изучение изменения структуры и механических свойств пористых анизотропных материалов – газаров после холодной пластической деформации прокаткой и волочением.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Образцы медных газаров отливали в герметичной печи (автоклаве), которая могла выдерживать давление различных газов до 10МПа или обеспечивать внутри вакуум до 20 ... 30 Па. Образцы для исследований изготавливали в виде медных отливок диаметром 10 и 20 мм и длиной 100 и

130 мм. Исследование процессов холодной деформации газаров проводили как при свободной продольной прокатке, так и при волочении круглых заготовок. Прокатку осуществляли на стане с двумя проходами в каждом калибре и кантованием заготовки на 90° . Обжатие заготовки по диаметру составляло до 40%. Деформация заготовки по диаметру в каждом калибре составляла около 10%. Волочение заготовок осуществляли на волочильном стане цепного типа. Применялись волокна с коническим профилем канала (угол наклона образующей к оси волочения 14°), материал волокна сплав ВК8 со шлифованной поверхностью. Скорость волочения составляла 0,2 м/с. В качестве смазки применяли сухой мыльный порошок. Разовое обжатие по диаметру за 1 проход составляло около 10%. Механические свойства газаров определяли по результатам испытаний на растягивание круглых образцов, проведенных на универсальной разрывной машине типа ТТДМ-Л со скоростью деформирования $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура деформированных образцов газаров значительно отличалась от исходной. Сечение пор и расстояние между ними заметно уменьшилось и достигало нескольких микрон (рис.1). Можно предположить, что уменьшение толщины перегородок повлияло на увеличение прочности газаров. Другая возможная причина связана с арочной структурой пор внутри образцов, которая всегда приводит к увеличению прочности конструкции (в данном случае структуры газара). В то же время заметную роль в упрочнении может играть наклеп металла в перемычках и в участках сварившихся в монолит поверхностных слоев образцов.

Результаты механических испытаний показали, что деформированные образцы газаров имели более высокие прочностные показатели при всех степенях деформации. Прокатанный прут газара после отжига для снятия внутренних напряжений при толщине 10 мм имел прочность в 1,5 ... 2 раза выше, чем равный по размерам монолитный. Не отожжённый деформированный образец газара имел прочность в 2 ... 3 раза выше, чем монолитный прут того же диаметра (рис. 2 б).

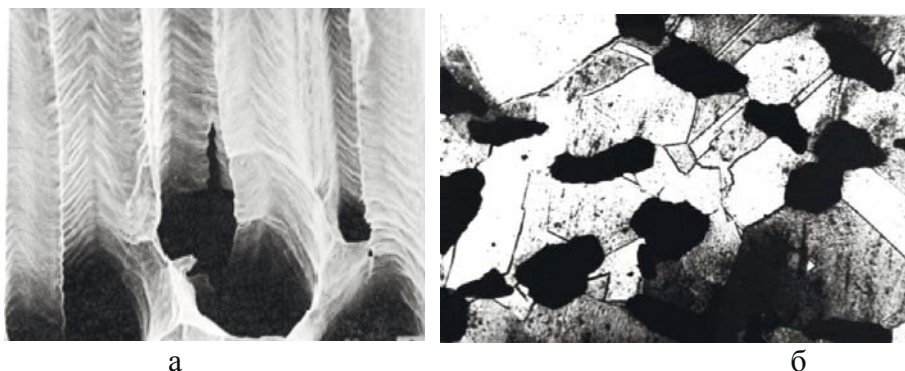


Рис. 1. Структура излома исходного образца медного газара (а, x100) и микроструктура деформированного образца газара (б, x200)

При исследовании деформированных образцов газаров было отмечено, что предел текучести зависит от степени деформации (рис. 2, а): с повышением степени деформации медных газаров предел текучести заметно повышался, но

эта зависимость не линейна. В то же время временное сопротивление образцов газаров заметно снижалось с увеличением пористости (рис. 2 б).

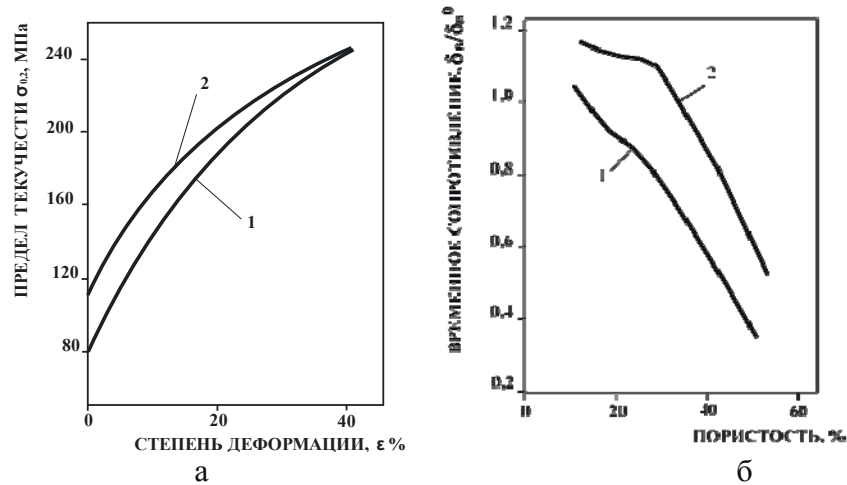


Рис. 2. Влияние степени деформации на предел текучести газаров (а) и пористости на временное сопротивление газаров (б): кр. 1 – в плоскости сечения образца, кр. 2 – в плоскости фактического сечения

Исследования показали, что при уменьшении расстояния между порами прочность образцов газаров повышалась (рис. 3).

Было установлено повышение временного сопротивления деформированных образцов газаров по площади фактического сечения. Это также связывалось с уменьшением толщины перегородок между порами. В интервале толщин 115 ... 40 мкм временное сопротивление практически не изменялось и лишь в интервале толщин 40 ... 20 мкм наблюдалось некоторое его повышение, которое более интенсивно росло с уменьшением толщины перегородок (рис. 4).

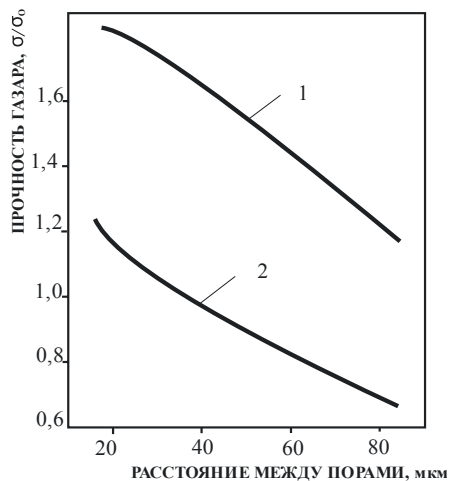


Рис. 3. Влияние расстояния между порами на прочность медных газаров по плоскости фактического сечения образца (кр. 1) и временное сопротивление по плоскости фактического сечения образца (кр. 2)

Эти результаты также подтверждают предположение о том, что повышение прочности газаров может быть достигнуто в результате утонения перегородок между порами, что возможно только при значительной деформации образцов. При высоком уровне пластической деформации образцов газаров их поверхностный слой уплотняется вплоть до сварки части пор. Это приводит к образованию на поверхности образцов практически

монолитного высокодефектного слоя. Это также способствует увеличению прочностных характеристик медных газаров после деформации.

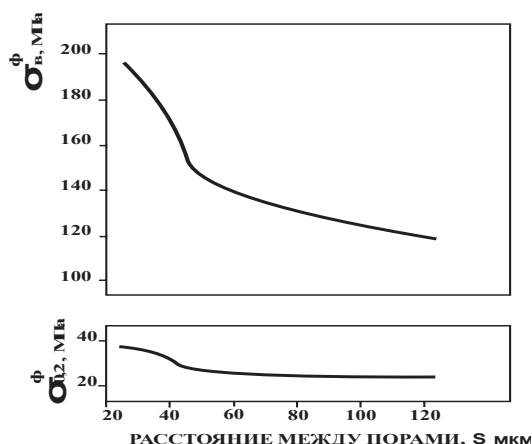


Рис. 4. Влияние расстояния между порами на прочность медных газаров (деформированных со степенью 30% и отожженных)

Изучение микроструктуры деформированных газаров показало, что уменьшение степени пористости и размеров пор при прокатке проходит более интенсивно, чем при волочении (рис. 5). Очевидно, это связано с различной схемой деформации при прокатке и волочении, что влечет различное распределение напряжения и деформаций в пористом материале. При волочении газаров степень деформации должна быть на 25 ... 40% выше, чем при прокатке для достижения одинаковых прочностных свойств.

Металл образца при прокатке в очаге деформации течет как в продольном, так и в радиальном направлении. При волочении деформация образцов происходит иначе. За счет создания дополнительных продольных растягивающих напряжений уменьшается радиальное течение металла. Часть металла, которая смещается в радиальном направлении заметно меньше. Соответственно деформация образца в продольном направлении больше, в сравнении со свободной прокаткой. Поэтому деформация образцов при волочении всегда меньше (рис. 5). Эта разница может достигать 20 ... 40%.

Деформация газаров, как при прокатке, так и при волочении связана с пластическим течением в перемычках и его взаимодействием с порами (рис. 6, а). Локально его можно представить следующим образом. При пластической деформации, развиваемой в медной перемычке, дислокации движутся в плоскостях скольжения, подходят к поверхности поры, испытывая силы отталкивания под действием сил отобразования [4]. Сдвиговые напряжения выталкивают первую дислокацию непосредственно на поверхность поры, существующей в структуре газара. На ней образуется микроступенька, равная по величине вектору Бюргерса дислокации b_i . Выход следующих дислокаций на поверхность поры и их слияние должны приводить к увеличению размера поры. При слиянии n -го количества дислокаций, подошедших к поверхности поры, их можно рассматривать как одну супердислокацию с вектором Бюргерса $b = n \cdot b_i$. Краевая компонента вектора Бюргерса супердислокации создает на поверхности поры растягивающие напряжения, которые обусловлены расклинивающим действием экстраплоскостей. Пластическая релаксация этих напряжений происходит в результате формоизменения поверхности поры, а также развития в прилегающих областях аккомодационных сдвиговых и ротационных процессов, о чем свидетельствует изгиб линий скольжения. При этом энергия дислокаций, вышедших на поверхность поры, переходит в поверхностную энергию последней $\gamma_{п.}$

Элементарное приращение размера поры, уже имеющейся в газозвтектической колонии и принимающей участие в деформации, пропорционально отношению энергии n дислокаций к двойной величине $\gamma_{п}$, а критическая деформация разрушения поры:

$$\epsilon_{кр} \sim \gamma_{п}/G_{п} \cdot b_i \quad (1)$$

где $G_{п}$ – модуль сдвига металла (меди) вблизи поверхности поры.

Очевидно, развитие деформации в металле перемычек связано с взаимодействием дислокаций в различных системах скольжения, что приводит к увеличению плотности дислокаций и наклепу.

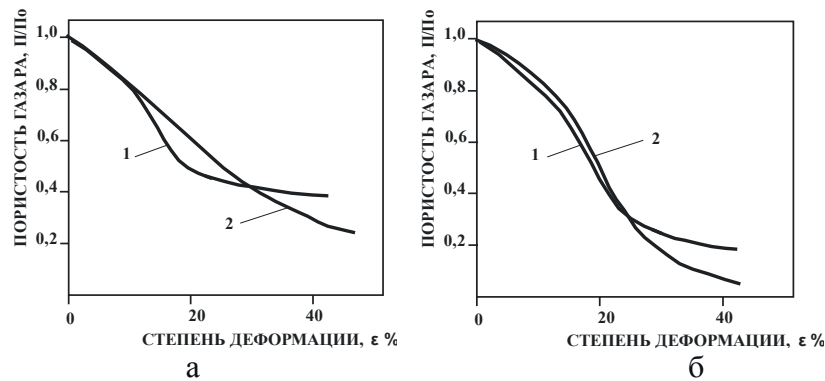


Рис. 5. Влияние степени деформации на пористость газа при деформация волочением (а) и прокаткой (б): кр. 1 – пористость 15%, кр. 2 – пористость 30%

При изучении структуры деформированных образцов газаров после отжига было обнаружено, что в пористой структуре металла появились рекристаллизованные зерна (рис. 6, б), что свидетельствует о прохождении первичной и собирательной рекристаллизации. При этом в рекристаллизованных зернах видны двойники отжига, связанные с возникновением и релаксацией напряжений в местах торможения мигрирующих границ зерен порами. До отжига подобных образований не наблюдалось. Вероятно, это связано с процессом собирательной рекристаллизации и миграции дефектов кристаллов к порам, которые работают как активные стоки вакансий. Большое количество мелких кристаллов и вид пор вокруг монолита подтверждает эту версию.

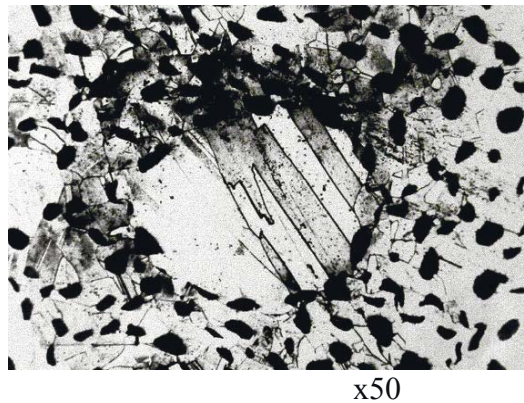


Рис. 6. Микроструктура деформированного газара после отжига

Полученные результаты показывают необходимость проведения дальнейших исследований изменения структуры и свойств газаров при холодной пластической деформации и последующем их отжиге. Эти исследования необходимы для нужд современной промышленности с целью разработки методов получения облегченных, конструкционных материалов, обладающих повышенной прочностью.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что пластическая деформация медных газаров прокаткой и волочением способствует изменению структуры пор и расстоянию между ними. При утонении перемычек между порами до 20 ... 10 мкм и ниже происходит заметное упрочнение газаров. Это имело место, как для прокатанных образцов, так и для подвергнутых деформации волочением. Предел текучести и временное сопротивление медных газаров в зависимости от способа холодной деформации снижается в 2 ... 3 раза по сравнению с монолитными образцами. Микроструктурные исследования показали, что при прокатке уменьшение пористости и сечения пор газаров проходит более интенсивно, чем при волочении. При волочении газаров их деформация должна быть на 25 ... 40% выше, чем при прокатке для достижения одинаковых прочностных свойств. Форма пор газаров, подвергнутых значительной деформации изменяется с цилиндрической на щелевидную. Образование высоко дефектного поверхностного слоя деформированных образцов газаров способствует повышению их прочности, которая после отжига снижается за счет уменьшения дефектности поверхностного слоя благодаря развитию рекристаллизационных процессов. За счет увеличения подвижности вакансий и дислокаций во время рекристаллизации внутри пористой структуры образуются монолитные участки. Это можно объяснить уходом дефектов в поры, которые являются активными стоками для них.

Визначено, що механічні властивості газарів залежать від ступеня й методу їх деформації, зміни пористої структури. Установлено, що при прокатці зміна міцностних властивостей газарів відбувається більш інтенсивне чим при волочінні на 25 - 40%. Показано, що поверхневі пористі шари газарів деформуються інтенсивне, стають практично монолітними й одержують високий рівень наклепу, що різко збільшує їхню міцність. Доведено, що деформовані, але не відпалені зразки мають міцність в 2 ... 3 рази вище чому монолітні зразки тих же розмірів. Після відпалу міцність газаров вище в 1,5 ... 2 рази. Розглянутий процес зміни структури газаров після відпалу для зняття внутрішніх напружень. Запропоновані можливі механізми зміни пористої структури газарів і збільшення їх міцності.

Ключові слова: прокатка, волочіння, газари, деформація, пори, наклеп.

It is determined that the mechanical properties of gazars depend on the degree and method of their deformation, changes in the porous structure. It is established that during rolling, the change in the strength properties of gazars occurs more intensively than when drawing by 25-40%. It is shown that the surface porous layers of gazars are intensively deformed, become practically monolithic and receive a high level of hard work, which sharply increases their strength. It is proved that deformed but not annealed samples have a strength of 2 ... 3 above higher than monolithic samples of the same dimensions. After annealing, the strength of gazars is 1.5 ... 2 above higher. The process of changing the structure of gazars after annealing for removing internal stresses is considered. Possible mechanisms for changing the porous structure of gazars and increasing their strength are proposed.

Key words: rolling, drawing, gas, deformation, pores, hardening.

1. *Карпов В.Ю.* Водород – легирующий элемент эвтектических сплавов – газаров / В.Ю. Карпов, В.И. Шаповалов, В.В. Карпов// Тезисы международной конференции ВОМ-2007. – Донецк. – 2007. – С. 577-580.
2. *Карпов В. Ю.* Формирование отливок газаров со сложной структурой /В. Ю. Карпов, С.И. Губенко, В.В. Карпов//Строительство, материаловедение, машиностроение, сборник научных трудов. Серия: Стародубовские чтения 2012, выпуск 64. ПДАБА. - Дн-вск. – 2012. – С. 324-329.
3. *Komissarchuk Olga* Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys/ Olga Komissarchuk, Xu Zhengbin, Hao Hai, Li Zuowei, Vladimir Karпов// China Foundry Research & Development. – 2014. – V.11. – N1. -P.1 – 7.
4. *Protopapas P.* Hydrogene dans metaux/ P.Protopapas, N. A. Parlee // – 1972. – № 2. – P. 419-423.