

УДК 621.756

Баглюк Г. А.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из наиболее эффективных процессов порошковой металлургии, обеспечивающих получение плотных (практически беспористых) изделий, в том числе и сложной формы, является горячая штамповка пористых заготовок. Этот процесс имеет много общего с классическими методами объемной штамповки компактных металлов, однако, наличие пористости обуславливает известные особенности пластического течения пористых материалов, так как, кроме формоизменения, характерного для беспористых материалов, сопровождается также необратимыми объемными изменениями. В связи с этим, наряду с обычными для компактных материалов условиями течения металла, характеризующимися наличием свободной поверхности в деформируемой заготовке, пористые материалы могут деформироваться в замкнутых объемах, когда нормальные нагрузки на всей поверхности тела являются сжимающими [1, 2].

При разработке технологического процесса, в особенности для деталей сложной формы, зачастую встает выбор между изготовлением заготовки близкой по форме к поковке и ее последующей простой горячей допрессовки до конечных размеров и плотности, или изготовлением заготовки простой геометрии и реализации при штамповке значительных поперечных (сдвиговых) деформаций для получения конечной формы поковки. Хотя степень поперечной деформации порошкового тела оказывает значительный эффект на поведение материала в условиях деформации, плотность получаемой структуры и прочность материала, однако в практике штамповки пористых заготовок первый метод нашел значительно более широкое применение, так как при использовании схем штамповки, которые обеспечивают быстрый переход от схемы одноосного сжатия к схеме неравномерного всестороннего сжатия уменьшается вероятность появления трещин на боковой поверхности заготовок. В то же время, при реализации такой схемы нагружения изделия, полученные допрессовкой при отсутствии ощутимых поперечных деформаций, обычно имеют остаточную пористость около 2 % [3, 4]. Это объясняется тем, что наиболее интенсивно закрытие пор происходит как раз при сдвиговых деформациях, а при обычной горячей допрессовке в закрытом штампе сдвиговые деформации сведены, как правило, к минимуму.

Целью данной работы является исследование влияния деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов.

В простейшем виде приведенное выше положение может быть наглядно проиллюстрировано схемой, представленной на рис. 1. Схема простого доуплотнения (рис. 1, а) отличается отсутствием или минимальным значением поперечной деформации, при которой происходит закрытие пор под действием простого осевого сжатия (рис. 2, а). В случае реализации схемы штамповки с поперечной деформацией (рис. 1, б) закрытие пор происходит в результате комбинации нормального давления и сдвига (рис. 2, б).

Следует, однако, принимать во внимание, что достигаемая плотность – не единственный критерий, определяющий формирование структуры и свойств металла. В зависимости от схемы напряженно-деформированного состояния при одинаковой конечной плотности порошкового металла изменяются, также, микроструктура, прочностные, пластические свойства и, особенно, ударная вязкость материала [5, 6].

Так, например, при исследовании влияния степени поперечной деформации на структуру и свойства горячештампованных образцов из порошка титана различной природы показано, что увеличение значения ε_r с 10 до 40 % способствует заметному росту как плотности, так и основных механических свойств материала поковки (рис. 3). Дальнейшее увеличение степени деформации при осадке сверх 40 % приводит как к уменьшению средней по объему плотности поковки (вследствие появления микро- и макротрещин на их боковой поверхности), так и соответствующего снижению механических характеристик получаемого материала [7].

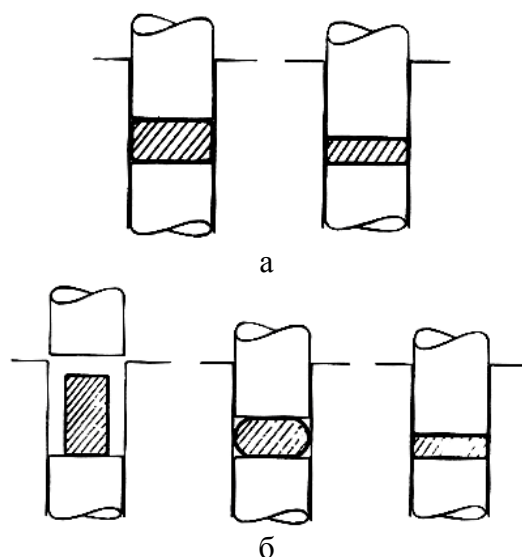


Рис. 1. Схемы закрытой штамповки пористых заготовок:

а – простой допрессовкой;
б – с элементами осадки

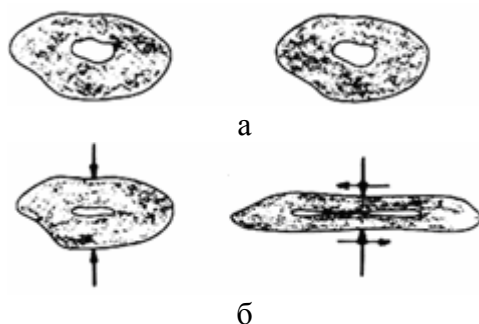


Рис. 2. Схемы закрытия пор при простом доуплотнении (а) и при штамповке со сдвиговыми деформациями (б)

Как показали результаты исследований микроструктуры горячештампованных образцов, увеличение степени поперечной деформации заготовок на первой стадии штамповки с 10 до 50 % приводит не только к повышению плотности изделий, но и к изменению размеров зерна (рис. 4). Структура металла, спеченного из порошка ПТЭС-1, крупнозернистая, зерна имеют полиэдрическую форму, характерную для литого титана ВТ1-0. Структура металла, спеченного из отсева титановой губки, состоит из крупных зерен пластинчатого типа. После горячей штамповки форма и размер зерен изменяется с увеличением степени деформации. Равноосное зерно под действием приложенного давления вытягивается вдоль направления течения металла, а величина зерен отожженного металла зависит от степени поперечной деформации при штамповке. В результате горячей штамповки всех исследуемых порошков со степенями деформации менее 10 % плотность изделий снижается, формируется крупнозернистая структура и, как следствие, уменьшаются показатели прочности и пластичности. Высокая относительная плотность изделий (99,5–100 %), равномерная мелкозернистая структура и свойства на уровне литого и деформированного титана обеспечиваются горячей штамповкой порошковых заготовок со степенями обжатия 30–40 % (рис. 4, а). Снижение плотности изделий, полученных при степенях деформации выше 50 %, также приводит к уменьшению показателей прочности и пластичности.

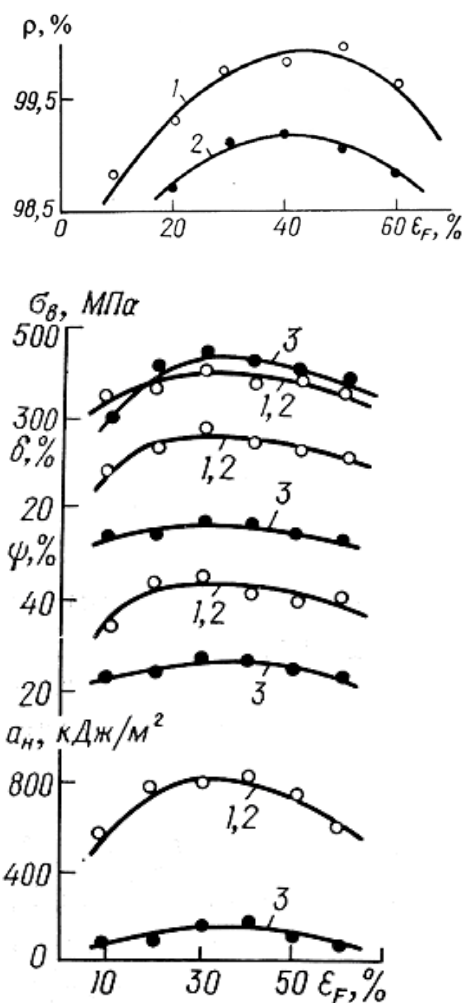


Рис. 3. Зависимость относительной плотности (а) и механических свойств (б) поковок от степени деформации при горячей штамповке порошков титана ПТЭС-1 (1), ПТЭК-2 (2) и отсевов титановой губки (3) [7]

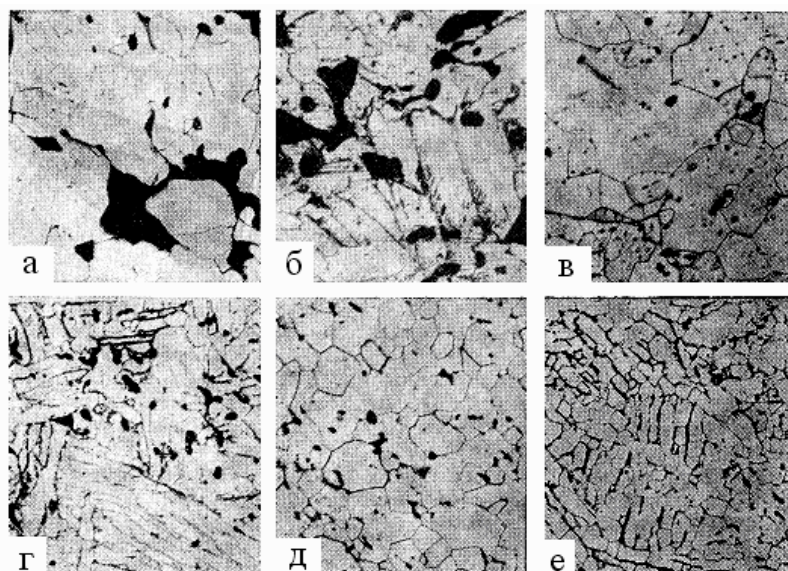


Рис. 4. Микроструктура исходных спеченных заготовок (а, б) и горячештампованных при степенях деформации 10 % (в, г) и 50 % (д, е) из порошка ПТЭС-1 (а, в, д) и отсева титановой губки (б, г, е); $\times 100$

Очевидно, что увеличение степени сдвиговых деформаций при штамповке может быть достигнуто как при реализации схемы свободной осадки на начальной стадии штамповки, так и при использовании схем деформации с элементами истечения (выдавливания). Сравнительный анализ прочностных свойств горячештампованных образцов из порошка ПЖ4МЗ, полученных с использованием схемы с элементами выдавливания и двусторонней допрессовки (рис. 5), свидетельствует о том, что за исключением предела прочности на срез остальные характеристики поковок, полученных по схеме с выдавливанием, существенно превышают таковые для поковок, полученных допрессовкой (табл. 1). Разница в свойствах уменьшается с увеличением температуры отжига и уменьшением температуры горячей штамповки [6].

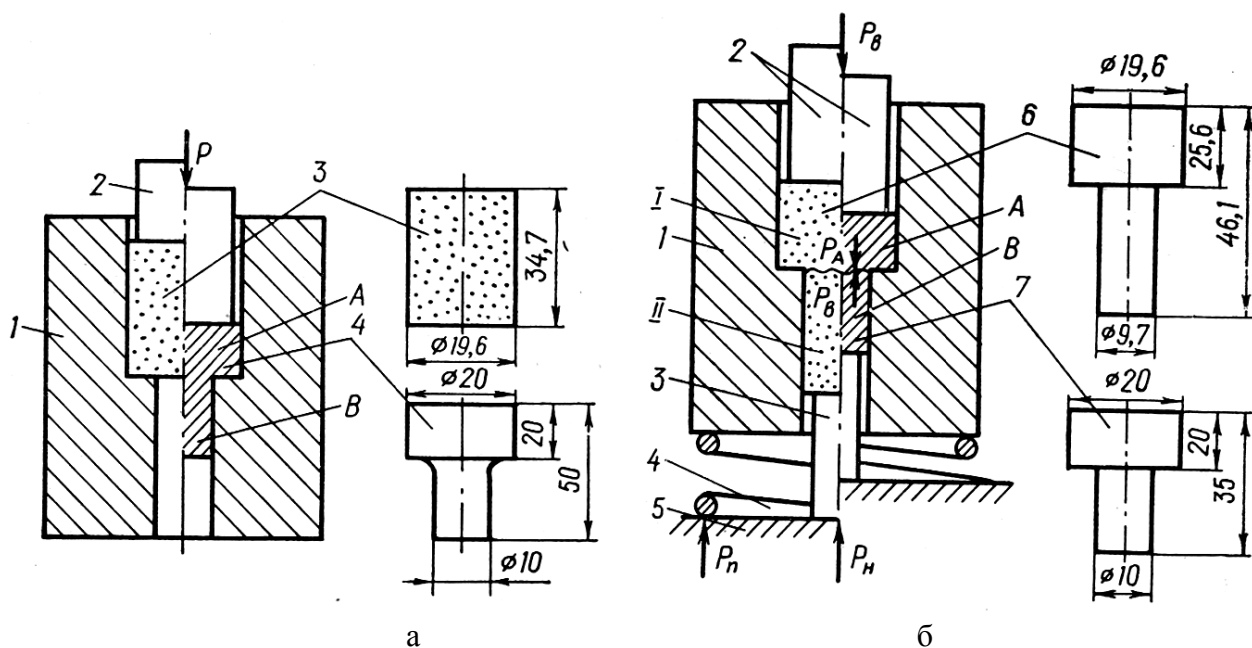


Рис. 5. Схемы штамповки с элементами выдавливания (а) и двусторонней допрессовки (б)

Анализ фрактограмм образцов после горячей штамповки с использованием различных схем показал, что при всестороннем неравномерном сжатии, характерном для допрессовки

без поперечных деформаций, на границах зерен образуются скопления оксидных пленок. С повышением уровня сдвиговых деформаций количество участков хрупкого межзеренного излома в образцах убывает, наблюдается рост количества зон разрыва оксидных пленок в объеме металла и усиление межзеренных диффузионных процессов.

Таблица 1

Влияние температуры штамповки и схемы деформации на свойства материала* [6]

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\Delta\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{ПР}}, \%$	$\delta, \%$	$\Delta\delta/\delta^{\text{ПР}}, \%$	$\psi, \%$	$\Delta\psi/\psi^{\text{ПР}}, \%$
950	248	296	5,7	15,5	34,5	26,9	3,0
	259	280		11,6		26,1	
1000	244	328	15,5	13,8	42,3	26,9	12,5
	263	284		9,7		23,6	
1050	252	363	31,5	12,8	56,1	20,3	18,0
	260	276		8,2		17,2	
1100	266	374	38,5	12,7	41,1	21,8	—
	270	270		9,0		—	
1150	269	373	32,3	12,7	24,5	23,6	0
	264	282		10,2		23,6	

* В числителе – штамповка с выдавливанием, в знаменателе – двусторонняя допрессовка.

Наличие проблем, связанных с уплотнением пористых порошковых заготовок при их штамповке с применением схемы простой допрессовки в закрытом штампе, способствовало более широкому использованию схем открытой или полужакрытой штамповки, широко применяемых в обработке давлением компактных сталей и сплавов. Отмеченная тенденция обусловлена тем, что при штамповке осадкой в закрытом штампе наиболее уплотненной является центральная часть заготовки, а зоны, прилегающие к торцевым и боковым поверхностям заготовки, являются зонами затрудненной деформации и имеют минимальную плотность. Схема напряжений на заключительной стадии процесса максимально приближается к всестороннему сжатию, что препятствует росту величины интенсивности сдвиговых деформаций и соответствующей ей конечной плотности. В то же время, изменением граничных условий деформации при штамповке с элементами истечения в зонах затрудненной деформации можно регулировать распределение интенсивности сдвиговых деформаций и плотности в объеме заготовки и получать беспористый материал. Это достигается в результате создания дополнительных очагов деформации в застойных зонах, где, как правило, сконцентрирована остаточная пористость поковки.

В качестве примеров конструктивного исполнения дополнительных очагов деформации в штампах для горячей штамповки пористых заготовок могут служить приведенные на рис. 6 схемы совмещенного радиального и торцевого компенсаторов (рис. 6, а) и осевого выдавливания (рис. 6, б). Как показали результаты исследований [7], в изделиях, полученных с применением данных схем деформации, отмечается практически однородное распределение пористости, высокие показатели механических свойств и мелкозернистую структуру металла в большей части объема поковки (рис. 6, в, г). Некоторое увеличение размера зерна и наличие одиночных мелких пор наблюдается только в периферийных зонах I и II, в которых дополнительные очаги деформации не создавались (рис. 6, д, е).

Для оценки степени развитости очага деформации в [7] предложен оценочный параметр – коэффициента истечения $K_{\text{ист.}} = B/S$, где B – характерный размер изделия, S – высота (ширина) компенсационной щели. Относительный объем очага деформации V^* определяется из зависимости: $V^* = V_{\text{о.д.}}/V_{\text{изд.}}$, где $V_{\text{о.д.}}$ – объем очага деформации; $V_{\text{изд.}}$ – объем поковки.

Создание дополнительных очагов деформации приводит к увеличению деформированного объема металла и интенсивности сдвиговых деформаций, приводящих к росту степени уплотнения материала.

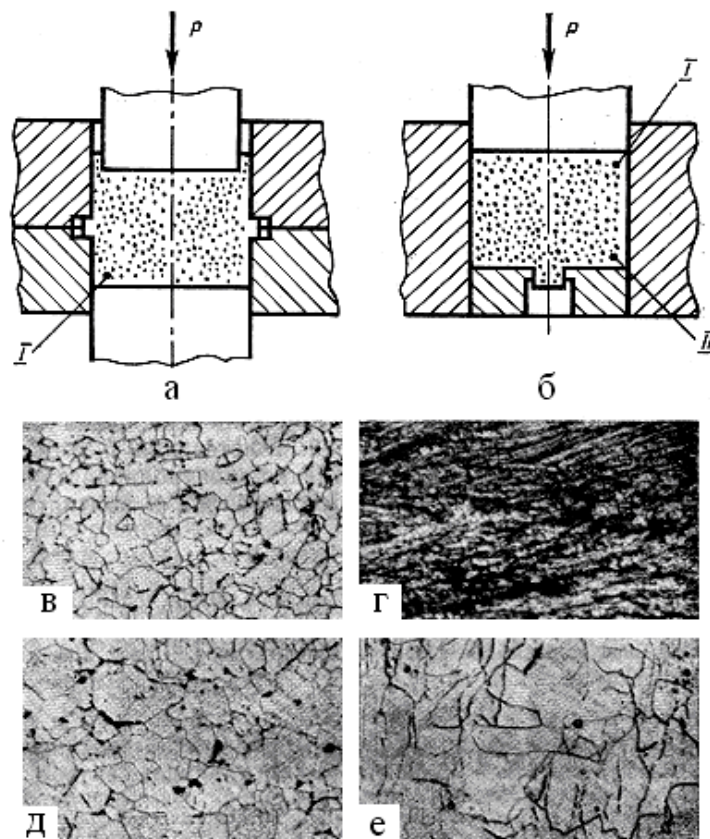


Рис. 6. Схемы штамповки с дополнительными очагами деформации (а, б) и структура заготовок в центральных (в, г) и периферийных (I, II) зонах поковки из порошка титана ПТЭС-1 [7]

Одной из схем штамповки с развитым очагом деформации является штамповка пористых заготовок в открытых штампах, характеризующаяся переменным зазором между верхней и нижней полуматрицами, в который вытесняется избыток материала заготовки [8, 9]. Отличительной особенностью открытой штамповки является наличие на протяжении всего процесса деформации изменяющегося по высоте участка заготовки со свободной боковой поверхностью, имеющего возможность течения в поперечном направлении. При этом очевидно, что соотношение между интенсивностью заполнения полости штампа (и, соответственно, уплотнением материала), и течением материала в облой на различных стадиях процесса, определяет качество оформления элементов поковки и свойства отштампованного материала. Сравнительный анализ картины течения материала пористой заготовки при ее горячей штамповке в открытом (1) и закрытом (2) штампе (рис. 7, а), полученный с использованием метода сеток, свидетельствует о наличии существенно более развитого очага поперечной деформации при использовании схемы открытой штамповки (рис. 7, б) по сравнению с закрытой (рис. 7, в). Такой характер деформации оказывает заметное влияние на структуру полученного материала: как видно из рис. 7, г, структура горячештампованной в открытом штампе поковки отличается существенно большей степенью дисперсности и наличием ярко выраженной текстуры, по сравнению с поковкой, отштампованной простой допрессовкой (рис. 7, д).

Увеличение степени деформации материала частиц при штамповке пористых порошковых заготовок может быть достигнуто не только путем применения схем с очагами сдвиговой деформации, но и за счет уменьшения исходной пористости заготовки [10]. Это обусловлено тем, что, в отличие от компактных металлов, степень накопленной деформации

материала при деформировании пористых материалов определяется как интенсивностью сдвиговых деформаций, так и шаровой составляющей тензора деформаций, характеризующей его уплотнение.

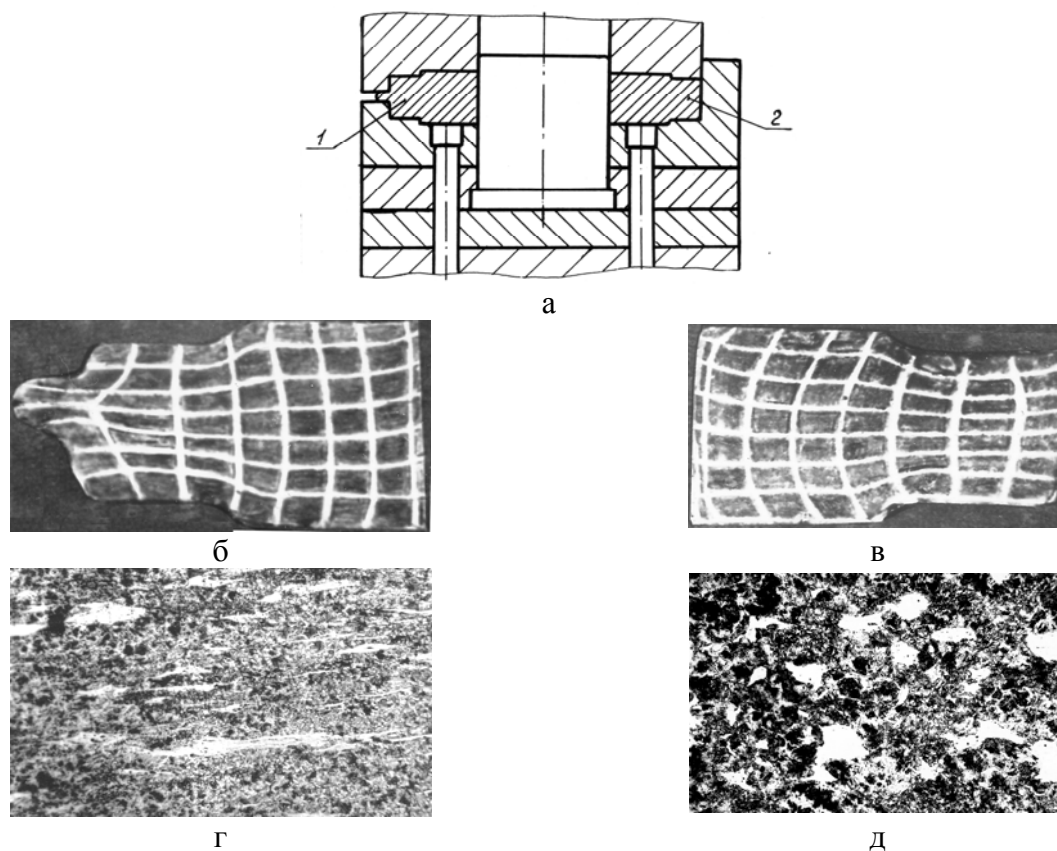


Рис. 7. Схема штамповки (а); характер изменения линий сетки в поковках (б, в) и структура получаемого материала (г, д) после штамповки в открытом (1, б, г) и закрытом (2, в, д) штампе

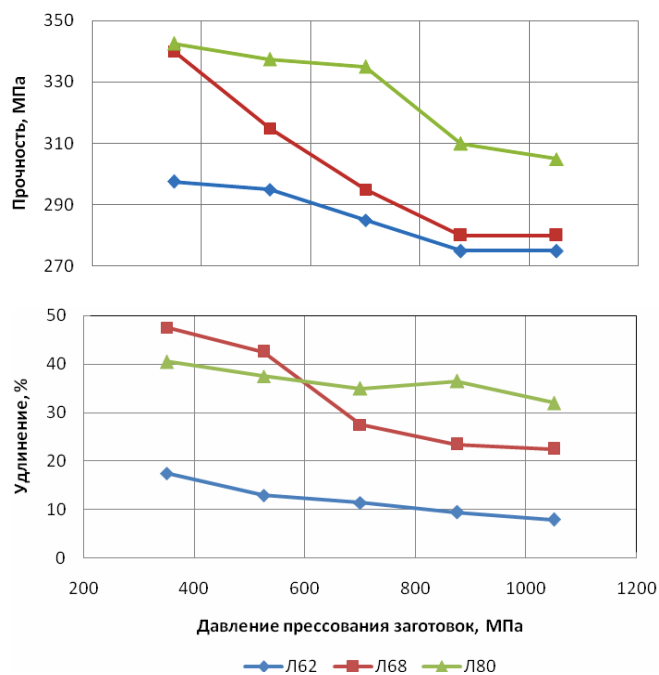


Рис. 8. Влияние давления прессования исходных заготовок на прочностные и пластические свойства горячештампованных материалов из порошков латуни

Для оценки влияния исходной пористости заготовок на структуру и свойства горячештампованных материалов, спрессованные под давлением 350–1050 МПа (вследствие чего они имели различную исходную пористость) и спеченные заготовки из порошков латуни марок Л62, Л68 и Л80 после кратковременного нагревали в аргоне до 850 °С и штамповали на дугостаторном прессе в закрытом штампе. После штамповки относительная плотность всех поковок составляла 98,5–99 %. Анализ основных механических свойств полученных поковок позволяет сделать вывод, что с повышением давления прессования заготовок под штамповку как прочностные, так и пластические свойства материала снижаются (рис. 8), что объясняется снижением степени деформации при штамповке заготовок с более высокой исходной плотностью. Структура горячештампованных порошковых латуней, полученных из заготовок с высокой плотностью, более крупнозернистая и отличается значительной степенью неоднородности.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что как структура, так и основные механические свойства горячештампованных порошковых материалов существенно зависят от схемы деформации в процессе штамповки. Применение схем деформации с развитым очагом поперечной деформации позволяет получать материалы с дисперсной структурой, повышенными прочностными и пластическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Дорофеев Ю. Г., Гасанов Б. Г., Дорофеев В. Ю. и др. – М. : Металлургия, 1990. – 206 с.
2. Кун Х. А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок / Х. А. Кун // Порошковая металлургия материалов специального назначения. – М. : Металлургия, 1977. – С. 143–158.
3. Баглюк Г. А. Технологические проблемы процессов горячей штамповки пористых заготовок / Г. А. Баглюк // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2009. – Вип. 56. – С. 93–100.
4. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций / Г. А. Баглюк // Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів : збірник наук. праць. – Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
5. Kuhn H. A. How Flow and Fracture Affect Design of Preforms for Powder Forging / H. A. Kuhn, C. L. Downey // The International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology. – 1974. – Vol. 10, No. 1. – P. 59–66.
6. Дорофеев В. Ю. Структура и свойства порошкового материала, формируемого при горячей штамповке с элементами выдавливания / В. Ю. Дорофеев // Порошковая металлургия. – 1985. – № 7. – С. 23–27.
7. Павлов В. А. Влияние горячей деформации на формирование структуры и свойств порошковых металлов / В. А. Павлов, М. И. Носенко // Порошковая металлургия. – 1988. – № 2. – С. 16–20.
8. Баглюк Г. А. Расчет пластического течения пористого материала при штамповке в открытом штампе / Г. А. Баглюк, В. Л. Юрчук // Порошковая металлургия. – 1997. – № 7/8. – С. 1–7.
9. Баглюк Г. А. Моделирование процесса деформации пористой заготовки в открытом штампе / Г. А. Баглюк // Порошковая металлургия. – 1997. – № 9/10. – С. 5–7.
10. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок / Ю. Г. Дорофеев. – М. : Металлургия, 1977. – 216 с.

Баглюк Г. А. – д-р техн. наук, зам. директора ИПМ НАН Украины.

ИПМ НАН Украины – Институт проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, г. Киев.

E-mail: gbag@rambler.ru