

УДК 621.762.4

д.т.н. Рябичева Л. А.,
Нагорный Е. В.

(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА УПРОЧНЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В статье исследовано совместное влияние температуры, скорости и степени деформации, исходной пористости образцов на процессы упрочнения порошковых медно-титановых материалов путём сжатия при повышенных температурах. Показано, что процессы уплотнения и упрочнения порошковой среды являются взаимосвязанными и определяются условиями деформации и исходной пористостью материала.

Ключевые слова: температуры, скорость, степень деформации, деформационное упрочнение, плотность, пористость.

Применение термомеханической обработки для формирования структурообразования и механических свойств сталей вызвало интерес к исследованиям динамических процессов разупрочнения порошковых материалов [1]. Динамические процессы разупрочнения наблюдаются как при тёплой, так и при горячей деформации компактных материалов. В порошковых материалах разупрочнение обычно связывают с наличием фазы пор и процессами, происходящими в частицах твёрдой фазы [2, 3]. Очевидно, основные закономерности процессов разупрочнения компактных материалов можно использовать для анализа деформирования порошковых материалов. При этом наличие пористости должно оказывать влияние на эволюцию микроструктуры и, соответственно, характеристики напряжённно-деформированного состояния.

Основными параметрами, характеризующими технологический процесс пресования порошковых материалов, являются температура, степень и скорость деформации [4]. Температура определяет вид разупрочняющих процессов. Скорость деформации влияет на их интенсивность. Степень деформации является параметром, определяющим вклад разупрочнения в физические процессы деформации.

Целью работы является анализ влияния температурно-скоростных условий деформирования на упрочнение и изменение пористости порошковых двухкомпонентных материалов.

Образцы изготавливали из механической смеси порошков меди ПМС-1 и титана ВТ1-0 с массовой долей титана 0,5 %. Диаметр образцов 8 мм, высота 12,86 мм, пористость 5 и 10 %, получали двусторонним пресованием на гидравлическом прессе силой 1000 кН. После спекания в среде генераторного газа в течение 3 ч выполняли одноосное сжатие на испытательной машине ZD-4 при скорости деформации 0,01 и 0,001 с⁻¹ в интервале температур 20–700 °С со степенью деформации 60 %. Полученные при сжатии индикаторные диаграммы перестраивали в координаты «напряжение – истинная деформация» по методике [5].

Зависимость «напряжение – деформация» описывается выражением

$$\sigma = \sigma_0 + Ke_z^n, \quad (1)$$

где σ и σ_0 — текущее и начальное сопротивление твёрдой фазы соответственно; e_z — истинная осевая деформация; K и n — коэффициент и показатель деформационного упрочнения соответственно.

Приращение напряжения ($\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$) и осевая деформация e_z связаны выражением

$$\ln \Delta\sigma = \ln K - n \ln e_z. \quad (2)$$

Согласно выражению (2) строили зависимости $\ln\Delta\sigma - \ln e_z$, по которым определяли величину показателя упрочнения n (табл. 1).

Таблица 1

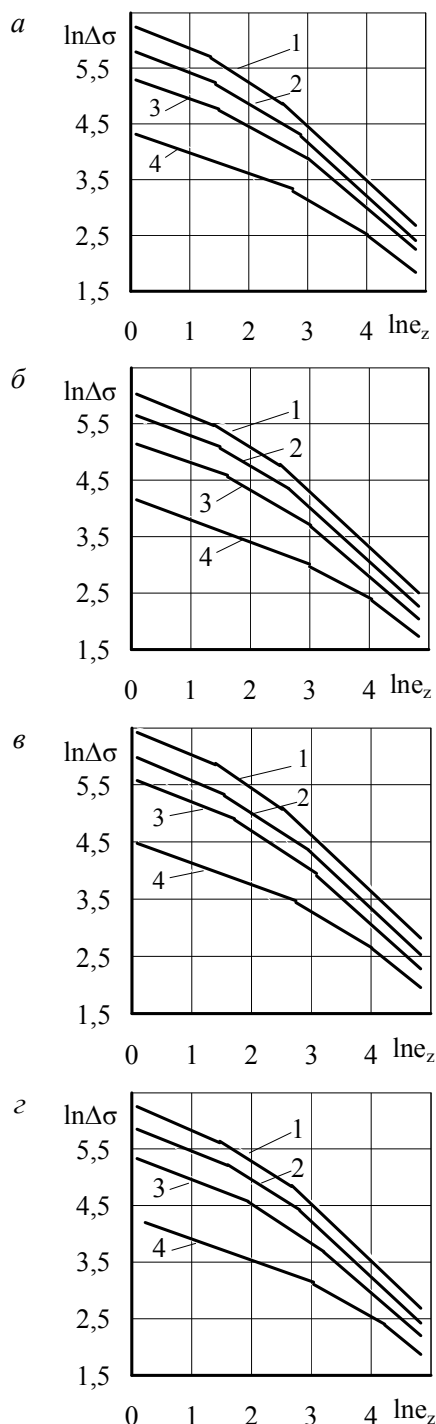
Величина показателя деформационного упрочнения n в зависимости от скорости и температуры деформации при одноосном сжатии

t, °C	n ₁		n ₂		n ₃	
	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹
Исходная пористость 5 %						
20	0,98	0,97	0,67	0,65	0,43	0,40
300	0,90	0,88	0,58	0,54	0,37	0,35
400	0,95	0,94	0,63	0,6	0,41	0,38
700	0,82	0,8	0,54	0,52	0,34	0,3
Исходная пористость 10 %						
20	0,99	0,98	0,73	0,67	0,46	0,44
300	0,93	0,91	0,63	0,6	0,4	0,36
400	0,97	0,96	0,68	0,64	0,45	0,42
700	0,86	0,84	0,59	0,56	0,36	0,38

Характерно наличие трёх прямолинейных участков с углом наклона, зависящим от условий деформации и исходной пористости материала (рис. 1). Наличие трёх участков деформационного упрочнения свидетельствует об изменении механизма деформации, вызванного преобразованием дислокационных структур [6].

Увеличение скорости деформации при прочих равных условиях способствует повышению показателя деформационного упрочнения. С увеличением пористости наблюдается также рост показателя упрочнения n , что объясняется геометрическим упрочнением при уплотнении материала [7]. Повышение температуры деформации приводит к снижению показателя деформационного упрочнения вследствие развития процессов динамического возврата и рекристаллизации [4]. Однако деформационное старение при 400 °C обеспечивает увеличе-

ние показателя деформационного упрочнения [7], о чём свидетельствует повышение напряжений при этой температуре (рис. 1).



a, в — $\theta_0 = 5\%$; б, з — $\theta_0 = 10\%$;

1 — 20 °C, 2 — 400 °C, 3 — 300 °C, 4 — 700 °C

Рисунок 1 Зависимость $\ln\Delta\sigma - \ln e_z$ при скорости деформации 0,001 с⁻¹ — а, б; 0,01 с⁻¹ — в, з

Так же как и n , коэффициенты деформационного упрочнения K на трёх стадиях зависят от условий деформации и начальной пористости материала (рис. 2). С повышением температуры развиваются процессы динамического разупрочнения, поэтому коэффициент K имеет тенденцию к снижению. При температуре 400 °С, по аналогии с n , наблюдается увеличение K . Увеличение скорости деформации приводит к росту коэффициентов деформационного упрочнения. При исходной пористости 5 % K принимают большие значения, чем при 10 % (рис. 2). По мнению авторов [8], более интенсивное разупрочнение материалов с большей пористостью имеет структурную природу.

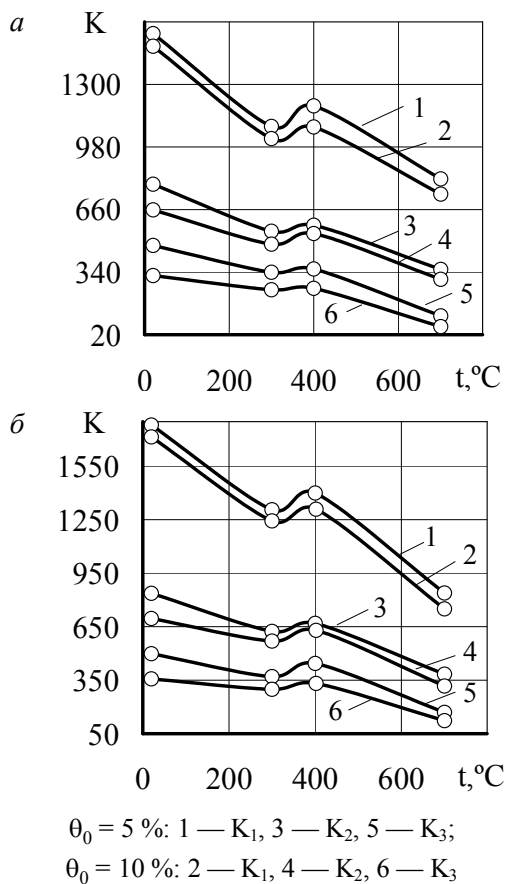
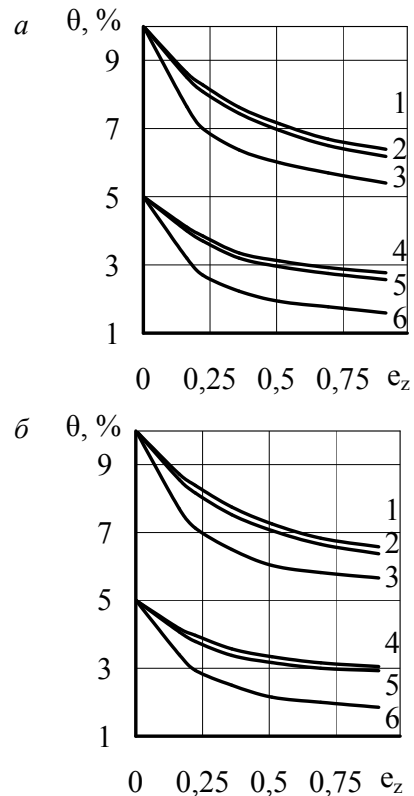


Рисунок 2 Зависимость коэффициентов деформационного упрочнения от температуры при скорости деформации $0,001\text{с}^{-1}$ — а; $0,01\text{с}^{-1}$ — б

Величина коэффициентов деформационного упрочнения (рис. 2) на первой стадии больше, чем на второй и третьей, что связано со сменой механизма деформации [9].

Деформация порошковых материалов при наличии сжимающих нагрузок сопровождается параллельно идущими процессами упрочнения и уплотнения. Исследования влияния температурно-скоростных условий деформации на изменение пористости порошковых медно-титановых материалов при одноосном сжатии представлены на рисунке 3.

С увеличением степени деформации наблюдается снижение пористости. Причём при большей скорости деформации это снижение более интенсивно. При обеих скоростях деформации пористость при температуре 400 °С изменяется менее интенсивно. Причина этому — всё то же деформационное старение твёрдой фазы.



1, 4 — 400 °С; 2, 5 — 300 °С; 3, 6 — 700 °С

Рисунок 3 Изменение пористости при скорости деформации $0,01\text{с}^{-1}$ — а; $0,001\text{с}^{-1}$ — б

С ростом температуры интенсивность уплотнения увеличивается. Исключение составляет поведение материала при температуре 400 °С. Характер процесса уплотнения описывается экспоненциальной зависимостью изменения пористости от осевой деформации [5]:

$$\theta = \theta_0 \exp(-ke_z), \quad (3)$$

где k — коэффициент интенсивности уплотнения.

Коэффициент интенсивности уплотнения определяется путём построения зависимостей $\ln \theta_0 / \theta - e_z$, углы касательных к которым соответствуют значениям k (табл. 2).

Таблица 2

Величина коэффициента интенсивности уплотнения k в зависимости от скорости деформации при одноосном сжатии

t, °С	k_1		k_2		k_3	
	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹	0,01 с ⁻¹	0,001 с ⁻¹
Исходная пористость 5 %						
300	1,25	1,1	0,46	0,38	0,31	0,25
400	1,12	0,94	0,41	0,35	0,24	0,2
700	2,76	2,37	1,17	1,09	0,52	0,41
Исходная пористость 10 %						
300	0,83	0,78	0,41	0,38	0,23	0,20
400	0,76	0,71	0,39	0,37	0,21	0,18
700	1,61	1,53	0,64	0,56	0,31	0,28

На начальной стадии деформирования происходит интенсивное уплотнение образцов, которое характеризуется наиболее высоким коэффициентом k_1 . С увеличением степени деформации интенсивность уплотнения снижается, и значения k_2 и k_3 уменьшаются. Механизмом, приводящим к уменьшению пористости материалов, является вытягивание пор и последующее схватывание их стенок. С увеличением

степени деформации возрастает деформационное упрочнение, препятствующее этому процессу. Коэффициент интенсивности уплотнения образцов с исходной пористостью 5 % больше, чем с пористостью 10 % (табл. 2).

На характер уплотнения оказывают влияние температура и скорость деформации, а также исходная пористость образца. С повышением скорости деформации коэффициенты k на каждой стадии принимают большие значения. Повышение температуры активизирует процессы разупрочнения, способствующие интенсивному уплотнению образцов. Особенность уплотнения порошковых медно-титановых материалов при повышенных температурах деформации состоит в том, что при 400 °С наблюдается снижение интенсивности данного процесса, вызванного упрочнением при этой температуре.

Вывод. Анализ влияния условий деформации на процессы уплотнения и упрочнения порошковых медно-титановых материалов с различной исходной пористостью при одноосном сжатии показал, что снижение скорости деформации приводит к уменьшению упрочнения и тем интенсивнее, чем выше температура и больше исходная пористость образцов. Рост степени деформации сопровождается уменьшением пористости, причём данный процесс происходит тем интенсивнее, чем ниже исходная пористость деформируемого тела и выше скорость деформации. Влияние температуры на уплотнение порошковых медно-титановых материалов выражается в снижении пористости с её ростом. Исключение составляет поведение материала при 400 °С, когда развиваются процессы динамического деформационного старения.

Библиографический список

1. Рябичева, Л. А. К вопросу разупрочнения при горячей деформации [Текст] / Л. А. Рябичева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. — Краматорськ, 2002. — С.173–177.

2. Humphreys, F. J. Developing stable fine-grain microstructures by large strain deformation [Text] / F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, J. R. Bowen, A. Gholinia, C. Harris // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* — 1999. — Vol. 357. — P. 1663–1681.
3. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Текст] / М. Л. Бернштейн. — М. : Металлургия, 1968. — 1171 с.
4. Наумичев, Б. А. Уплотнение пористых заготовок при пластическом деформировании [Текст] / Б. А. Наумичев // *Кузнечно-штамповочное производство.* — 1992. — № 7. — С. 6–7.
5. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов [Текст] / В. И. Трефилов, В. Ф. Мусеев, Э. П. Печковский и др.; под ред. В. И. Трефилова. — К. : Наук. думка, 1987. — 248 с.
6. Ryabicheva, L. The influence of warm deforming modes on compaction of porous copper billets [Text] / L. Ryabicheva, D. Usatuk, Y. Nikitin // *Third international conference & exhibition on powder metallurgy.* — Romania : Technical University of Cluj-Napoca, 2005. — P. 224–226.
7. Ryabicheva, L. A. Deformation and destruction of porous copper at the elevated temperatures [Text] / L. A. Ryabicheva, D. A. Usatyuk // *Materials Science Forum Vols.* — 2007. — № 10. — P. 588–589.
8. Структура и прочность порошковых материалов [Текст] / С. А. Фирстов, А. Н. Демидык, И. И. Иванова и др.; под ред. С. А. Фирстова, М. Шлесара. — К. : Наук. думка, 1993. — 175 с.
9. Datta, A. The structure and properties of age hardening Cu–Ti alloys [Text] / A. Datta, W. A. Soffa // *Acta met.* — 1976. — 24, № 11. — P. 987–1001.

© Рябичева Л. А.© Нагорный Е. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТУ Денищенко П. Н., к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиС ЛНУ им. В. Даля Стояновым А. А.

Статья поступила в редакцию 09.10.18.

д.т.н. Рябичева Л. О., Нагорный Е. В. (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, ryabic@gmail.com)
ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ І ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ НА ЗМІЦНЕННЯ ПОРОШКОВИХ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

У статті досліджено спільний вплив температури, швидкості та ступеня деформації, вихідної пористості зразків на процеси зміцнення порошкових мідно-титанових матеріалів шляхом стиснення при підвищених температурах. Показано, що процеси ущільнення і зміцнення порошкового середовища є взаємопов'язаними і визначаються умовами деформації та вихідною пористістю матеріалу.

Ключові слова: температура, швидкість, ступінь деформації, деформаційне зміцнення, щільність, пористість.

Doctor of Tech. Sc. Ryabicheva L. A., Nagorni E. V. (LNU after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com)

EFFECT OF TEMPERATURE AND STRAIN RATE ON HARDENING A POWDER TWO-COMPONENT SYSTEMS AT ELEVATED TEMPERATURES

The article deals with the study of the combined effect of temperature, rate and degree of deformation, the initial porosity of patterns on the processes of hardening the powder copper-titanium materials under compression at elevated temperatures. It is shown that the processes of compaction and hardening of the powder are interrelated and are determined by the deformation conditions and the initial porosity of the material.

Key words: temperature, rate, degree of deformation, strain hardening, density, porosity.