DOI: 10.18721/JEST.24417 УДК 621.762:669.018.28:669.721.5

В.Н. Цеменко, С.В. Ганин, М.Ю. Замоздра

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИЕЙ МАГНИЕВОЙ СТРУЖКИ

Изучен и реализован процесс получения заготовок из стружки магниевого сплава MA5 методом горячей экструзии. Процесс реализовывали при температурах нагрева 300, 350 и 400 °C со средними коэффициентами экструзии 9, 13 и 24. В процессе горячей экструзии происходило уплотнение в матрице заготовок, полученных холодным прессованием частиц стружки, разрушение оксидных пленок на поверхности и распределение по всему объему заготовки дисперсных частиц оксида при пластическом течении материала через фильеру. В результате протекания процессов рекристаллизации и деформационного упрочнения, интенсивность которых определялась температурами и коэффициентами вытяжки, происходило формирование структуры материала. Установлено, что степень пластической деформации и температура процесса экструзии неоднозначно влияют на механические свойства заготовок при статических испытаниях на растяжение и сжатие, определенную роль при этом играет и остаточная пористость. Прочностные характеристики полученных заготовок несколько выше прочности деформированных литых заготовок из сплава MA5, однако ниже по пластичности.

Ключевые слова: порошковая металлургия, переработка стружки, магниевые сплавы, горячая экструзия, механические свойства.

Ссылка при цитировании:

В.Н. Цеменко, С.В. Ганин, М.Ю. Замоздра. Механические свойства заготовок, полученных горячей экструзией магниевой стружки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 169–184. DOI: 10.18721/JEST.24417.

V.N. Tsemenko, S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

MECHANICAL PROPERTIES OF BILLETS PRODUCED BY HOT EXTRUSION OF MAGNESIUM CHIPS

The process of billets producing from the magnesium alloy chip MA5 by hot extrusion was studied and realized. The process was realized at heating temperatures of 300, 350 and 400°C with average extrusion coefficients of 9, 13 and 24. In the process of hot extrusion occurred compaction in the matrix of blanks produced by cold pressing of chip particles; destruction of oxide films on the surface and distribution throughout the volume of the workpiece dispersed oxide particles during the plastic flow of the material through the die. As a result of the processes of recrystallization and deformation hardening, the intensity of which was determined by the temperatures and the coefficients of extraction, the structure of the material was formed. It is found that the degree of plastic deformation and the temperature of the extrusion process have an ambiguous effect on the mechanical properties of the workpieces in static tests for tension and compression, a certain role is played by the residual porosity. The strength characteristics of the obtained billets are slightly higher than the strength of the deformed cast billets from the MA5 alloy, however, lower in plasticity.

Keywords: powder metallurgy, chip processing, magnesium alloys, hot extrusion, mechanical properties.

Citation:

V.N. Tsemenko, S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra, Mechanical properties of billets produced by hot extrusion of magnesium chips, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 169–184, DOI: 10.18721/JEST.24417.

Введение

Производство деталей и изделий механической обработкой связано с получением большого количества стружковых отходов, в том числе при использовании магния и его сплавов. Все большее внимание инженеров и исследователей привлекают технологии переработки металлической стружки. Наиболее перспективным для этого является порошковая металлургия [1-6]. Широко используются твердофазные методы переработки, такие, как измельчение сырья с последующей горячей экструзией или равноканальным угловым прессованием, которые требуют меньших энергозатрат и меньше влияют на химический состав сплава. Вторичное использование стружки позволяет также эффективно решать проблему ее утилизации.

Актуально внедрение экономичных технологий переработки стружки в компактную форму [7], среди которых горячая экструзия — весьма перспективная область порошковой металлургии как для массового серийного производства в различных отраслях промышленности, так и для получения изделий специального назначения с заданными свойствами. Этим способом с минимальным количеством стадий переработки и хорошими экономическими показателями из стружки получают профили — круг, уголок и более сложные формы, которые можно использовать в тех областях техники, где требуются материалы малой плотности и средние по величине показатели прочности (400–500 МПа).

Технология горячей экструзии обладает общеизвестными достоинствами методов классической порошковой металлургии — высоким коэффициентом использования материала, низкими капитальными вложениями. Многие спрессованные порошковые детали имеют равную и даже большую прочность, чем детали, полученные классическими технологиями литья и обработки давлением. Горячая экструзия позволяет избежать применения такой важной для порошковой металлургии операции, как спекание [8]. Интенсивное пластическое деформирование при повышенных температурах в процессе экструзии разрушает и диспергирует оксидный слой на поверхности частиц металла, что позволяет компактировать изначально дискретный материал до сравнительно высокой плотности [9].

Сплавы на основе магния по физическим и механическим характеристикам успешно конкурируют с другими легкими конструкционными материалами, в первую очередь в тех областях, где снижение массы имеет первостепенное значение [10]. Они обладают высокими удельной прочностью, жесткостью и демпфирующими свойствами [11], технологичностью, многие сплавы хорошо свариваются, что весьма перспективно для применения материалов на основе магния в современной технике. Плотность магниевых сплавов составляет 65–70% от плотности стандартных алюминиевых сплавов, поэтому замена деталей и узлов из алюминиевых сплавов на магниевые позволяет снизить их вес на 25–30% [12].

Цель настоящей работы — исследование возможности применения горячей экструзии для компактирования магниевой стружки в полуфабрикаты и анализ влияния параметров процесса на механические свойства заготовок из сплава магния MA5.

Методика проведения исследований

Высокопрочный сплав MA5 широко используется для изготовления полуфабрикатов по схеме неравномерного всестороннего сжатия (прессование, ковка в фигурных бойках на гидравлических прессах, штамповка в закрытых штаммах и т. п.). Сплав MA5 способен термически упрочняться. Его химический состав, масс.%:

Легирующие компонен	ты	
Al	7,8–9,	2
Zn	0,2–0,	,8
Mn0,	15–0,	5
Примеси (не более)		
Cu	0,05	
Ni	0,005	,
Si	0,10	
Fe	0,05	
Be	0,002	2
Прочие	0,3	

Таблица 1

Table 1

Mechanical properties of extruded semi-finished products of the MA5 alloy

Механические свойства прессованных полуфабрикатов из сплава МА56

Полуфабрикаты	<i>Е</i> , ГПа	σ₀,2, МПа	σ _в , МПа	Δ, %	Ψ, %	$ au_{cp}, M\Pi a$	$\sigma_{-1}, M\Pi a$	НВ, МПа	α _н , Дж/см ²
Прутки	42,1	215	304	8	20	174	126	55	-
Поковки,штамповки	42,1	215	304	12	_	—	89	70	5

Механические свойства различных изделий из сплава MA5 указаны в табл. 1 [13].

Магниевые сплавы обладают узким температурным интервалом пластической обработки. В частности, относительно благоприятный диапазон температур деформации заготовок сплава MA5 в литом состоянии ограничен 300–350 °C. При превышении температуры 360–380 °C происходит резкое снижение пластических свойств сплава, которое на практике приводит к разрушению заготовки в процессе деформации. Это связано с оплавлением легкоплавких эвтектических составляющих по границам зёрен [13].

Магниевые сплавы при прессовании имеют достаточно высокое сопротивление деформации, приближающееся по величине к сопротивлению деформации твёрдых алюминиевых сплавов. Ввиду этого отмечается существенное повышение температуры в пластической зоне; в зависимости от начальной температуры заготовки и степени деформации при прессовании оно может достигать 200–250 °C. Тепловой эффект деформации тем выше, чем ниже начальная температура заготовки и выше степень деформации.

Для экспериментального получения заготовок была использована стружка сплава MA5 из отходов производства после фрезерования автомобильных колесных дисков.

Для контроля диапазона основной фракции размеров частиц определен методом ситового анализа по ГОСТ 18318-94 гранулометрический состав исходной шихты. Насыпная плотность и плотность после утряски определены соответственно по ГОСТ 19440-94 и ГОСТ 25279-93. Эти характеристики использованы для расчета навески при прессовании заготовок для экструзии. Зависимости плотности исходной шихты от давления прессования определяли как прессуемость по ГОСТ 25280-82.

Заготовки для экструзии диаметром 28 мм получены холодным прессованием на прессе ПСУ50. Средняя высота заготовок составила 36 мм при сравнительно равномерном распределении плотности по высоте. В оснастку для экструзии загружали по две заготовки. Сверху и снизу сборной заготовки в качестве твердой смазки размещались графитовые шайбы (рис. 1) такого же диаметра высотой не более 5 мм. Графит уменьшал количество облоя, затекающего в область шайбы, что облегчало процесс отсоединения как матрицы, так и шайбы от прессостатка после экструзии, а также снижало усилие деформирования за счет снижения трения материала о стенки контейнера и фильеры.



Рис. 1. Сборная заготовка с шайбами из графита снизу и сверху Fig. 1. Prefabricated billet with graphite spacers of bottom and top



Рис. 2. Схема экструзии: 1 – исходная заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – заготовка после экструзии; 5 – фильера; 6 – опорная шайба Fig. 2. Extrusion scheme: 1 – initial billet; 2 – matrix; 3 – punch; 4 – billet after extrusion; 5 – die; 6 – thrust spacer

Двумя основополагающими факторами регулирования процесса выбраны температура и коэффициент вытяжки (диаметр выходного отверстия фильеры). Исходя из опытных данных по прессованию беспористых заготовок в качестве рабочих температур процесса экструзии были выбраны три режима — 300, 350, 400°С. Диаметры фильер — 6,4, 8,8, 10,5 мм — позволили осуществлять процесс со средними коэффициентами вытяжки — соответственно 9, 13 и 24. Процесс осуществлялся на прессе ПСУ-125.

На рис. 2 изображена схема процесса экструзии.

Для беспористых материалов коэффициент вытяжки можно определить по отношению длины полученной заготовки к начальной длине загружаемого материала. Для уплотняемых (дискретных) материалов коэффициент вытяжки тем ниже, чем ниже исходная плотность заготовки. Причем для уплотняемых материалов, в отличие от несжимаемых, в зависимости от параметров экструзии и исходных свойств материала эксперимент по деформации имеет два этапа [14, 16]:

уплотнение (подпрессовка) пористого материала в матрице до достаточно высокой плотности; процесс выдавливания через фильеру, при котором уплотнение материала сравнительно невелико, может отсутствовать и даже может происходить разуплотнение (разрыхление) материала, так как на этом этапе преобладает значительная сдвиговая деформация.

В этом случае коэффициент вытяжки можно определить по отношению площадей поперечного сечения материала до экструзии и после неё:

$$\lambda = \frac{S_{\rm HAY}}{S_{\rm KOH}},$$

где $S_{\text{нач}}$ — начальная площадь поперечного сечения заготовки; $S_{\text{кон}}$ — конечная площадь поперечного сечения заготовки.

Одно из основных преимуществ процесса экструзии состоит в том, что это соотношение можно изменять в довольно широких пределах, что позволяет осуществлять высокую степень пластической деформации материала, а коэффициент вытяжки использовать в качестве варьируемого параметра управления процессом [14–17].

В процессе горячей экструзии достигаются температуры и давления, при которых происходит рекристаллизация материала и формируется его структура. Параметры процесса экструзии должны обеспечивать получение качественной заготовки.

Для определения пористости и твердости прутков изготавливали шлифы в поперечном сечении заготовок. Пористость всех образцов определяли с помощью программы «Видео тест структура 5.2». Твёрдость прутков измерена на твердомере Zwick Roell ZHU.

Прочность прутков из сплава MA5, полученного горячей экструзией из стружки, оценивали при испытаниях на растяжение и сжатие. Испытания проводили на универсальной машине Zwick/Roell Z100 с максимальным усилием 100 кН при скорости деформирования 2 мм/мин. Образцы для испытаний на растяжение имели цилиндрическую форму длинной 110 мм. Для проведения испытания на сжатие от прутка отрезали образец с высотой равной диаметру.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные данные гранулометрического состава сведены в таблицу (табл. 2), на их основе построена интегральная кривая (рис. 3) распределения частиц по фракциям.

Как следует из приведенных данных, более 50 % частиц имели размер в диапазоне от 630 до 1250 мкм.

Таблица 2

Гранулометрический состав стружки сплава МА5

Table 2

Granulometric composition of MA5 alloy chips

Фракция, мкм	Массовая доля, %	Интегральный [*] состав, %
-400	0,4	0,4
-400-500	1,4	1,8
500-630	22,9	24,7
630-800	18,4	43,0
800-1000	21,6	64,6
1000-1250	17,9	82,6
1250-1600	8,1	90,7
1600	9,3	100,0

* «Интегральный» — включающий данную фракцию и более мелкие.



Puc. 3. Интегральная кривая распределения фракций по размерам Fig. 3. Integral distribution curve of fractions by size

Результаты измерений (в г/см³) насыпной плотности и плотности после утряски шихты из исходной:

Насыпная плотность (10 измерений	i)
min	0,46
max	0,51
med	0,49
Π_{10}	
плотность после утряски (10 измерен	iuu)
min	0,54
min max	0,54 0,56
min max med	0,54 0,56 0,55

Прессуемость характеризует уплоняемость и формуемость металлических порошков. Хорошая уплотняемость порошков облегчает процесс прессования, так как требуется меньшее давление для достижения заданной плотности заготовки, а хорошая формуемость обеспечивает получение более прочных, неосыпающихся образцов при меньшей плотности.

В табл. 3 приведены результаты прессования образцов из стружки при комнатной температуре. По этим данным построены зависимости плотности от давления прессования (кривая уплотнения, рис. 4, a), а также пористости от давления прессования (рис. 4, δ).

Прочные неосыпающиеся прессовки были получены уже при сравнительно малом давлении — 300 МПа (при пористости 20 % и менее); этого вполне достаточно для получения заготовок под экструзию.

На основе определения технологических свойств исходного материала были получены холодным прессованием на прессе ПСУ50 заготовки для экструзии диаметром 28 мм, их характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 3

Данные прессуемости магниевой стружки MA5 Macca порошка – 5 г; диаметр образцов – 17 мм

Table 3

№ образца	Усилие, т	Давление, МПа	Высота, мм	Объем, см ³	Плотность, г/см ³
1	5,6	241,9	15,80	3,58	1,40
2			16,20	3,68	1,36
3			15,90	3,61	1,39
Среднее			_	_	1,38
4	7,2	311,0	15,00	3,40	1,47
5			14,90	3,38	1,48
6			14,80	3,36	1,49
Среднее			—	—	1,48
7	8,8	380,1	14,30	3,24	1,54
8			14,30	3,24	1,54
9			14,60	3,31	1,51
Среднее			—	—	1,53
10	10,4	449,3	13,90	3,15	1,59
11			14,00	3,18	1,57
12			14,00	3,18	1,57
Среднее			—	—	1,58

Compressibility data of magnesium MA5 alloy chips Powder weight - 5 g; sample diameter - 17 mm



Рис. 4. Зависимости плотности (*a*) и пористости (δ) образцов от давления прессования Fig. 4. The dependences of sample density (*a*) and porosity (δ) vs pressing pressure

На рис. 5 показан образец прутка с прессостатком после экструзии.

В табл. 5 приведены параметры процесса экструзии и характеристики заготовок. Поверхностных дефектов у полученных прутков не наблюдалось.

В табл. 5 приведены также значения твердости образцов после экструзии и их остаточная пористость. Как следует из этих данных, значения твердости составляли от 75 до 100 HBW, а остаточная пористость находилась в пределах от 0,5 до 1,7 %.

В табл. 6 представлены результаты механических испытаний сплава МА5, полученного горячей экструзией из стружки, при растяжении и сжатии.

Таблица 4

Свойства заготовок из магниевой стружки МА5 для процесса экструзии

Table 4

№ заготовки	Высота <i>h</i> , мм	Объем <i>V</i> , см ³	Масса заготовки <i>m</i> , г	Плотность, г/см ³	Пористость П, %
1	35.9	17.61	24.6	1.4	22
2	36.5	17.91	24.9	1.39	23
3	36	17.66	24.9	1.41	22
4	36.4	17.86	24.9	1.39	23
5	36.35	17.83	25	1.4	22
6	36.5	17.91	24.9	1.39	23
7	36.3	17.81	25	1.4	22
8	36	17.66	24.9	1.41	22
9	36.6	17.96	25	1.39	23
10	36.5	17.91	24.9	1.39	23
11	36.7	18.01	24.9	1.38	23
12	36.6	17.96	24.9	1.39	23
13	36.6	17.96	25	1.39	23
14	36.4	17.86	24.9	1.39	23
15	35.9	17.61	25	1.42	21
16	36.4	17.86	24.9	1.39	23
17	36.3	17.81	24.9	1.4	22
18	37.6	18.45	25.6	1.39	23
19	35.5	17.42	24.7	1.42	21
20	36.2	17.76	24.9	1.4	22



Рис. 5. Образец прутка из магниевой стружки MA-5, полученный методом горячей экструзии Fig. 5. The sample of the rod of magnesium MA5 alloy shavings, produced by the method of hot extrusion

Металлургия и материаловедение

Таблица 5

Параметры прутков, полученных методом экструзии

Table 5

									1			1
06-	Темпе-	Диаметр	Диаметр	Macca	Объем	Ллина	Плот-	Порис-	Твер-	Vсилие	Дав-	Скорость
00	ратура,	фильеры,	заготовки,	F	00bcm,	длиц,	ность,	тость,	дость,	<i>5</i> C (1)(1)(2)	ление,	экструзии,
разец	°C	MM	MM	Г	CM	CM [°] MM	г/см ³	%	HBW	10	МПа	мм/сек
1	400	10,5	10,1	40,9	24,0	300	1,70	1,5	85	17,5	252	1,13
2	350		10,1	40,9	23,7	296	1,73	1,7	90	20,0	289	1,52
3	300		10,2	39,2	24,3	296	1,61	1,7	86	26,3	379	0,97
4	400	8,8	8,6	44,1	24,5	425	1,80	0,5	76	17,0	245	2,02
5	350		8,7	42,1	23,8	398	1,77	0,8	74	21,3	307	1,99
6	300		8,6	40,3	22,6	390	1,78	0,5	79	26,3	379	1,24
7	400	6,4	6,3	37,7	22,0	700	1,71	0,6	83	28,0	404	3,50
8	350		6,2	36,2	20,6	688	1,76	0,8	98	35,0	505	3,44
9	300		6,3	34,7	20,5	650	1,70	1,0	97	38,0	548	3,25

Rods parameters produced by extrusion

Таблица б

Механические свойства прутков сплава МА-5, изготовленных методом горячей экструзии

Table 6

	-	-							
No	Темпе-		Растяж	сение		Сжатие			
л∘ образца	ратура, °С	<i>d</i> _{ср} прутка	Коэф. вытяжки λ	<λ>	Предел проч- ности, МПа	<i>d</i> _{ср} прутка	Коэф. вытяжки, λ	<λ>	Предел проч- ности, МПа
1	400	9,2	10,6	11,0	341	10,2	8,7	8,7	417
2	350	9,0	11,1		332	10,1	8,8		404
3	300	8,9	11,3		313	10,2	8,7		384
4	400	8,5	12,5	12,5	316	8,5	12,5	12,9	418
5	350	8,5	12,3		304	8,3	13,1		433
6	300	8,4	12,8		260	8,3	13,1		465
7	400	6,0	25,3	24,6	301	6,1	24,2	23,7	478
8	350	6,1	24,2		282	6,3	22,7		494
9	300	6,1	24,4		278	6,1	24,2		516

Mechanical properties of MA5 alloy rods produced by hot-extrusion



Рис. 6. Образец до и после испытания на сжатие Fig. 6. The sample before and after compression test

При испытании на сжатие разрушение образцов происходило практически хрупко без образования бочки и с диагональной трещиной (рис. 6). По данным табл. 6 построены зависимости давления разрушения от коэффициента вытяжки при постоянных температурах процесса экструзии (рис. 7, a), а также давления разрушения от температуры при постоянных средних значениях коэффициента вытяжки (рис. 7, δ).



Рис. 7. Зависимость предела прочности магниевых прутков от температуры экструзии при $\overline{\lambda} = \text{const}(a)$ и от коэффициента вытяжки при $T = \text{const}(\delta)$ Fig. 7. The dependence of the tensile strength of magnesium rods vs the extrusion temperature at $\overline{\lambda} = \text{const}(a)$ and the drawing ratio at $T = \text{const}(\delta)$

На рис. 8 приведена общая зависимость предела прочности от температуры процесса экструзии и коэффициента вытяжки.

Как следует из приведенных результатов предел прочности на сжатие полученных образцов заготовок зависит как от температуры экструзии, так и от коэффициента вытяжки (степени пластической деформации). Чем выше коэффициент вытяжки, тем выше предел прочности. Чем ниже температура протекания процесса, тем выше давление разрушения.

На рис. 8 приведены фотографии образцов заготовок, полученных при различных параметрах процесса экструзии, после испытаний на растяжение. На них видно, что разрушение всех образцов происходит практически хрупко, как и при испытании на сжатие. Это свидетельствует о существенном влиянии на пластические характеристики остаточной пористости образцов.



Рис. 8. Зависимость предела прочности магниевых прутков от температуры и коэффициента вытяжки при испытании на сжатие

Fig. 8. The dependence of the tensile strength of magnesium rods vs temperature and extrusion ratio at compression testing



№ 1. *T* = 400 °С, *d* = 9,2 мм



№ 4. *T* = 400 °С, *d* = 8,6 мм



№ 7. *T* = 400 °С. *d* = 6,1 мм





№ 5. *T* = 350 °С, *d* = 8,6мм



№ 8. *T* = 350 °С, *d* = 6,1мм



№ 6. *T* = 300 °C, *d* = 8,5мм

№ 3. *T* = 300 °С, *d* = 9мм

№ 9. *T* = 300 °С, *d* = 6,1мм

Рис. 9. Вид образцов заготовок после разрушения при растяжении Fig. 9. Type of sample blanks after tensile failure



Рис. 10. Зависимость предела прочности магниевых прутков от температуры экструзии при $\overline{\lambda} = \text{const}(a)$ и от коэффициента вытяжки при $T = \text{const}(\delta)$ Fig. 10. The dependence of the tensile strength of magnesium rods vs the extrusion temperature at $\overline{\lambda} = \text{const}(a)$ and the drawing ratio at $T = \text{const}(\delta)$

По данным табл. 6, приняв один из параметров процесса экструзии постоянным, построили графики зависимостей предела

прочности от температуры экструзии (рис. 10, *a*) и среднего коэффициента вытяжки (рис. 10, δ).



Рис. 11. Зависимость предела прочности магниевых прутков от температуры и коэффициента вытяжки при испытании на растяжение Fig. 11. Dependence of the tensile strength of magnesium rods vs temperature and drawing ratio during tensile testing

На рис. 11 приведена общая зависимость предела прочности от температуры процесса экструзии и коэффициента вытяжки.

Из представленных графических результатов видно, что предел прочности образцов при растяжении зависит как от температуры процесса экструзии, так и от коэффициента вытяжки, однако эта зависимость обратная по сравнению с испытаниям на сжатие. Чем выше температура, тем большее давление приходится прикладывать для разрыва образцов; чем меньше обжатие (больший выходной диаметр фильеры), тем выше предел прочности. Максимальные значения предела прочности при сжатии выше значений при растяжении для тех же параметров образцов заготовок. Здесь также проявляется фактор влияния остаточной пористости материалов, причем при испытаниях на сжатие материал ведет себя как бездефектный, разрушаясь хрупко. При испытании на растяжение поры по межчастичным границам являются концентраторами напряжений, приводящими к хрупкому разрушению.

Заключение

В работе осуществлен процесс получения заготовок из стружки магниевого сплава MA5 методом горячей экструзии. Получение заготовок осуществлялось при температурах нагрева 300, 350 и 400 °C. Эти режимы были выбраны на основе опыта пластического деформирования литых заготовок из сплава MA5. Степень пластической деформации регулировалась обжатием заготовок в фильерах. Диаметры фильер – 6,4, 8,8 и 10,5 – позволили осуществить процесс горячей экструзии со средними коэффициентами экструзии – 9, 13 и 24.

В процессе горячей экструзии происходило уплотнение в матрице заготовок, полученных холодным прессованием частиц стружки, а также разрушение оксидных пленок на поверхности и распределение по всему объему заготовки дисперсных частиц оксида при пластическом течении материала через фильеру. В результате протекания процессов рекристаллизации и деформационного упрочнения, интенсивность которых определялась температурами и коэффициентами вытяжки, происходило формирование структуры материала.

Установлено, что степень пластической деформации и температура процесса экструзии неоднозначно влияют на механические свойства заготовок при статических испытаниях на растяжение и сжатие; определенную роль при этом играет и остаточная пористость. В результате прочность заготовок при растяжении ниже прочности при сжатии. Прочностные характеристики полученных заготовок несколько выше прочности деформированных литых заготовок из сплава МА5, однако значительно ниже по пластичности (разрушаются хрупко).

Повышение пластичности материала может быть осуществлено при дополнительной пластической деформации — горячей уплотняющей прокаткой заготовок. Эта операция может быть совмещена с процессом получения заданного профиля проката.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.

2. Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.

3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.

4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.

5. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.

6. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.

7. Гиршов В.Л., Рудской А.И., Цеменко В.Н. Переработка металлической стружки способами порошковой металлургии и пластической деформации // Труды СПбГПУ. № 510. Материалы и химические технологии. 2009. С. 18–27.

8. Николас А., Рольник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // Аэрокосмический курьер. 2011. № 1. С. 42–44. 9. Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. СПб.: Наука, 2012. 416 с.

10. Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния // МиТОМ. 2006. № 11. С. 5–9.

11. Матвеев В.В., Ярославский Г.Я., Чайковский Б.С., Кондратьев С.Ю. Сплавы высокого демпфирования на медной основе. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.

12. Рудской А.И., Цеменко В.Н., Ганин С.В. Исследование процессов уплотнения и деформирования порошкового композиционного материала системы алюминий – редкоземельные элементы // МиТОМ. 2014. №10. С. 25–31.

13. Альтман М.Б., Антипова А.П., Блохина В.А. [и др.]. Магниевые сплавы. Справочник. В 2 ч. Ч. 1. Металловедение магния и его сплавов. Области применения. М.: Металлургия, 1978. 232 с.

14. **Tsemenko V.N., Ganin S.V., Phuc D.V.** Research and simulation of the deformation process of dispersion-hardened powder in a capsule // Materials Physics and Mechanics. 2016. Vol. 25. Is. 1. P. 68–76.

15. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело // Научнотехнические ведомости СПбГПУ. 2016. № 2. С. 124–133. DOI: 10.5862/JEST.243.13.

16. Рудской А.И. Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Условие пластичности порошковых материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 4. С. 93–98. 17. Фук Д.В., Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 1. С. 100–110. DOI: 10.5862/JEST.238.10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: plast-ftim@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

ЗАМОЗДРА Максим Юрьевич — инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: zamozdra myu@spbstu.ru

Дата поступления статьи редакцию: 08.10.2018

REFERENCES

[1] Rudskoy A.I., Volkov K.N., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskikh poroshkov iz rasplava. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018. 610 s. (rus.)

[2] **Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondratyev S.Yu.** Novyye additivnyye tekhnologii s ispolzovaniyem puchka ionov. *Vestnik mashinostroyeniya*. 2016. № 9. S. 72– 76. (rus.)

[3] **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskikh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem.* 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

[4] **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnym luchom v vakuume. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

[5] **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii.* 2014. № 8. S. 40–45.

[6] Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A. Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv. Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2015. \mathbb{N} 2. S. 35–41. (rus.)

[7] Girshov V.L., Rudskoy A.I., Tsemenko V.N. Pererabotka metallicheskoy struzhki sposobami poroshkovoy metallurgii i plasticheskoy deformatsii. *Trudy SPbGPU*. № 510. *Materialy i khimicheskiye tekhnologii*. 2009. S. 18–27. (rus.)

[8] Nikolas A., Rolnik S. Primeneniye magniyevykh komponentov v aerokosmicheskoy industrii. *Aerokosmicheskiy kuryer*. 2011. № 1. S. 42–44. (rus.)

[9] **Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristykh materialov. SPb.: Nauka, 2012. 416 s. (rus.)

[10] **Volkova Ye.F.** Sovremennyye deformiruyemyye splavy i kompozitsionnyye materialy na osnove magniya. *MiTOM*. 2006. № 11. S. 5–9. (rus.)

[11] Matveyev V.V., Yaroslavskiy G.Ya., Chaykovskiy B.S., Kondratyev S.Yu. Splavy vysokogo dempfirovaniya na mednoy osnove. Kiyev: Naukova dumka, 1986. 208 s. (rus.)

[12] Rudskoy A.I., Tsemenko V.N., Ganin S.V. Issledovaniye protsessov uplotneniya i deformirovaniya poroshkovogo kompozitsionnogo materiala sistemy alyuminiy – redkozemelnyye element. *MiTOM*. 2014. \mathbb{N} 10. S. 25–31. (rus.)

[13] **Altman M.B., Antipova A.P., Blokhina V.A. [i dr.].** Magniyevyye splavy. Spravochnik. V 2 ch. Ch. 1. Metallovedeniye magniya i yego splavov. Oblasti primeneniya. M.: Metallurgiya, 1978. 232 s. (rus.)

[14] **Tsemenko V.N., Ganin S.V., Phuc D.V.** Research and simulation of the deformation process of dispersion-hardened powder in a capsule. *Materials Physics and Mechanics.* 2016. Vol. 25. Is. 1. P. 68–76.

[15] **Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V.** Opredeleniye reologicheskikh kharakteristik i modelirovaniye protsessa ekstruzii poroshkovykh i poristykh materialov. Chast 1. Poroshkovoye telo. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. №2. S. 124–133. DOI: 10.5862/JEST.243.13. (rus.)

[16] **Rudskoy A.I. Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Usloviye plastichnosti poroshkovykh materialov. *Vestnik* Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2006. № 4. S. 93–98. (rus.)

[17] **Fuk D.V., Tsemenko V.N., Ganin S.V.** Modelirovaniye i issledovaniye protsessa uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmnogo paketa ABAQUS. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. №1. S. 100–110. DOI: 10.5862/JEST.238.10. (rus.)

THE AUTHORS

TSEMENKO Valerii N. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university E-mail: plast-ftim@mail.ru GANIN Sergei V. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university E-mail: S.V.Ganin@gmail.com ZAMOZDRA Maksim Yu. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university E-mail: zamozdra_myu@spbstu.ru

Received: 08.10.2018

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018