УДК 621.762

Д.В. Слабкий, М.А. Федосеева
Научные руководители: кандидат технических наук, доцент А.А. Волхонский, кандидат технических наук, профессор С.Н. Сергеенко

ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ СТРУЖКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д-16

Исследовано влияние времени размола (1,8 – 14,4 кс) и концентрации легирующих элементов (0 – 6 % масс.) в шихте на гранулометрический состав и механические свойства материала на основе измельченной стружки Д-16. Установлена бимодальная зависимость распределения частиц по размерам. Оптимизировано содержание легирующих элементов и времени размола, обеспечивающие максимальный выход фракций, размером -63 мкм.

Механохимическая активация, стружка Д-16, измельчение.

The influence of grinding time (1,8 – 14,4 ks) and concentration of alloys (0 – 6 % mass) in fusion mixture on granulometric composition and mechanical properties of the material based on chippings D-16 is investigated. The bimodal dependence of particles distribution according to their size is established. The content of alloys and grinding time providing the maximum output of fractions of the size -63 mkm is optimized.

Mechanochemical activation, chippings D-16, grinding.

Введение. В ЮРГТУ (НПИ) разработаны технологии получения горячедеформированных порошковых материалов на основе механохимически активированной стружки алюминиевого сплава Д-16. При оптимальных значениях содержания насыщенного водного раствора борной кислоты в шихте (20 % масс.) и времени обработки стружки в высокоэнергетической мельнице (10,8 кс) обеспечивается образование малосвязанных агломератов, состоящих из частиц с меньшим размером. Закономерности измельчения определяются не только временем размола, но и составом размольной среды [4] и введением легирующих элементов. В результате исследований показано, что легирующие добавки влияют на процессы измельчения и агломерации, определяющие особенности формования холоднопрессованных заготовок и горячедеформированных порошковых материалов с повышенными физико-механическими свойствами [3], [4].

Горячедеформированные порошковые материалы на основе механически легированных распыленных порошков алюминий-титан (4 – 6 % масс.) обеспечивают повышенные механические свойства [7]. Образование дисперсной фазы Al_3Ti (5 % масс. Ti), сдерживает рост зерен в процессе уплотнения порошкового материала [1], [6]. В эвтектических сплавах Al-Fe, дисперсная фаза Al_3Fe упрочняет алюминиевую матрицу [2]. Введение 2 – 6 % масс. Ni повышает микротвердость и прочность при испытаниях на многоцикловую усталостность [5].

Цель работы: установить закономерности влияния содержания порошка ферротитана и никеля на кинетику размола, гранулометрический состав и физико-механические свойства горячедеформированных порошковых материалов на основе механически активированной стружки Д-16.

Методики проведения исследований. В качестве исходных материалов использовали стружку алюминиевого сплава Д-16 толщиной 0,5 – 1,0 мм и шириной 1 – 5 мм, полученную в процессе токарной обработки. При исследовании влияния времени размола $\tau_р$ (1,8 – 14,4 кс) на гранулометрический состав измельченной стружки в шихту вводили 0 – 6 % масс. ферротитана ФТи35С7 (ГОСТ 4761-91) и 0 – 6 % масс. никеля ПНК-УТ1, а также насыщенный водный раствор борной кислоты (20 % от массы шихты) для защиты от окисления материала стружки Д-16 [3], [4].

Механическое активирование (МХА) стружки проводили в шаровой планетарной мельнице «САНД-1» при скорости вращения ротора 290 об/мин. и соотношении масс шаров ($d_{шаров}$ = 10 мм) и шихты $M_{шаров}$: $m_{шихты}$ = 10:1. С целью изучения процессов агломерации шихты при ее обработке в САНД-1 проводили ручную обработку (РО) в керамической ступке (0,9 кс). После гранулометрического анализа (ГОСТ 18318-94) проводилось разделение по фракциям +630 мкм и -630 мкм с последующим смешиванием части активированной стружки Д16 с порошком алюминия (ПА-4, ГОСТ 6058-73), в соотношении 1:1 (табл. 1).

Формовку прессовали на гидравлическом прессе (455 МПа). Предварительный нагрев (550°С, 0,15 кс) проводили в электрической печи, с последующим динамическим горячим прессованием на копре с массой падающих частей 50 кг с приведенной энергией 140 МДж/м^3.

Таблица 1

Сводная таблица составов шихт

Обозначение шихты	$\Delta R_{Д16+(Л.Э.)}$, мкм	$C_{Д16+(Л.Э.)}$, % масс.	C_{Al}, % масс.
+630+ПА (Ш1)	+630	50	50
-630+ПА (Ш2)	-630		
+630 (Ш3)	+630	100	0
-630 (Ш4)	-630		

Для оценки степени агломерации порошковой шихты при ее механической активации определяли показатель ПАГ с учетом среднего размера частиц после МХА (d_0) и последующей обработке в ступе (d_1):

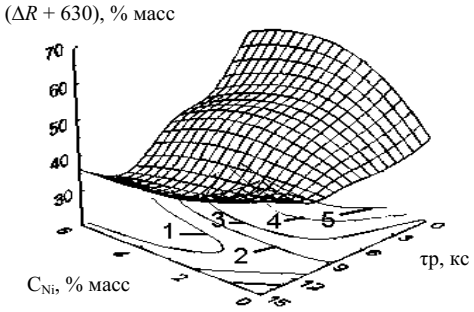
$$\text{ПАГ} = \frac{d_0}{d_1}.$$

Исследования механических свойств заключалось в определении твердости (HRE) горячепрессованного порошкового материала на твердомере 5006 УХЛ42 (di = 3,175 мм, F = 980,7 Н) и прочности на срез в специальном устройстве на разрывной машине.

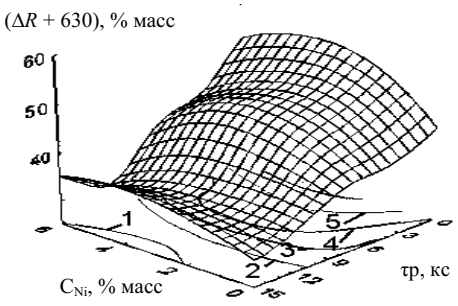
Результаты экспериментальных исследований

Анализ экспериментальных зависимостей влияния концентраций ферротитана и никеля, и времени размола $\tau_р$ на выход фракций +630 мкм (рис. 1, 2) показал, что введение добавок интенсифицирует процесс измельчения. Минимальное значение выхода фракций размером +630 мкм обеспечивается при повышенной концентрации добавок (6 % масс.) и времени обработки (14,4 кс).

В результате проведенных исследований гранулометрического состава выявлено бимодальное распределение частиц по размерам (рис. 3), характеризующееся повышенным содержанием фракций с размером -63 мкм.

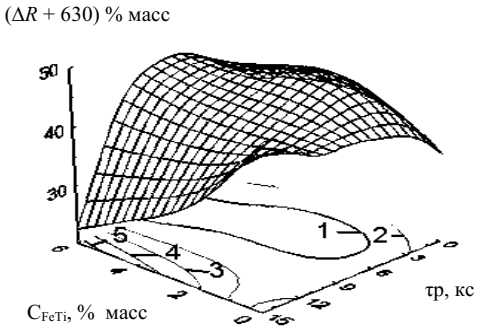


а

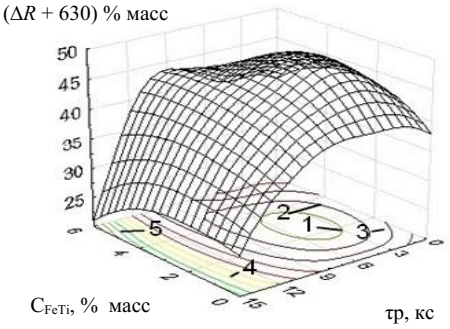


б

Рис. 1. 3-D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола ($\tau_р$) и концентрации никеля (C_{Ni}) и изолинии ΔR + 630, % масс. (1- < 35, 2-35…40, 3-40…45, 4-45…50, 5-50…55):
а – после МХА, б – после МХА и РО

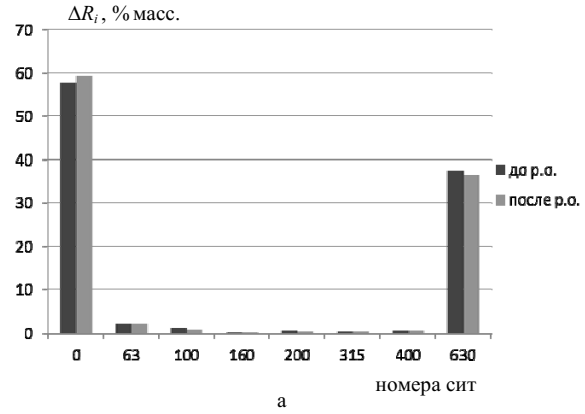


а

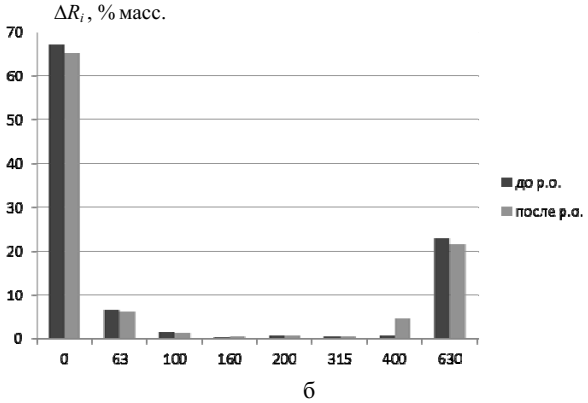


б

Рис. 2. 3-D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола ($\tau_р$) и концентрации ферротитана (C_{FeTi}) и изолинии ΔR + 630, % масс. (1- > 45, 2-45…40, 3-40…35, 4-35…30, 5-30…25):
а – после МХА, б – после МХА и РО



а



б

Рис. 3. Гистограмма распределения частиц по размерам:
а – Ni; б – FeTi ($C_{л.э.}$= 6 % масс, τ = 14,4 кс)

Максимальное значение плотности горячедеформированного порошкового материала (ГДПМ) на образцах на основе смеси МХА стружкового порошка с добавлением порошка алюминия наблюдается на основе шихт полученных при времени размола 3,6 кс и 6 % легирующего элемента (2,95 г/см^3 – Ш4 (FeTi), и 2,96 г/см^3 – Ш2 (Ni)). Введение порошка алюминия снижает плотность горячедеформированного материала (табл. 2).

Проведенный анализ экспериментальных данных твердости ГДПМ показал (табл. 3), что минимальные значения твердости (36 HRE) наблюдали в образцах на основе материала без добавления порошка алюминия и легирующих элементов при времени 14,4 кс. Максимальные значения твердости имеют образцы, полученные из материала при времени МХА 1,8 кс при концентрации легирующего элемента для никеля – 4 % масс., для ферротитана – 2 % масс. Таким образом, минимальные и максимальные значения твердости имеют образцы без добавления порошка алюминия. Максимальное значение предела прочности на срез наблюдается в образцах с содержанием легирующего элемента 2 % масс. из чистого материала с временем МХА для никеля 10,8 кс, а для ферротитана 1,8 кс и 4 % масс. ферротитана без добавления порошка алюминия.

Таблица 2

Плотность горячедеформированных порошковых материалов

Время обработки $\tau_р$, кс	Слэ, % от массы стружки	Плотность, $\rho_{гш}$, г/см^3							
		Стружка Д16+никель (л.э.)				Стружка Д16+ферротитан (л.э.)			
		(+630)	(+630) +ПА	(-630)	(-630) +ПА	(+630)	(+630) +ПА	(-630)	(-630) +ПА
1,8	0	2,70	2,66	2,79	2,64	2,70	2,66	2,79	2,64
	2	2,71	**2,61**	2,67	2,52	2,72	2,67	2,91	2,65
	4	2,72	2,64	**2,91**	2,64	2,75	2,72	2,92	2,66
	6	2,76	2,68	2,87	2,61	2,74	2,68	2,87	2,67
3,6	0	2,73	2,68	2,67	2,66	2,73	2,68	2,67	2,66
	2	2,70	2,65	2,63	**2,47**	2,76	2,67	2,57	2,67
	4	2,72	2,69	2,73	2,71	2,75	2,67	2,87	2,65
	6	2,90	2,70	2,78	**2,96**	2,70	2,68	**2,95**	2,67
5,4	0	**2,64**	**2,76**	2,83	2,68	**2,47**	2,70	2,83	2,68
	2	2,74	2,69	2,78	2,61	2,74	2,67	2,59	2,67
	4	**2,92**	2,70	2,57	2,63	2,71	**2,65**	2,78	2,64
	6	2,75	2,72	2,56	2,68	2,75	2,70	2,66	2,69
7,2	0	2,74	2,70	2,57	2,63	2,74	2,70	2,57	**2,63**
	2	2,70	2,71	2,64	2,84	2,73	2,67	2,57	2,64
	4	2,65	2,72	2,57		2,86	2,71	2,47	2,73
	6	2,77	2,71	2,56	2,69	2,80	2,70	2,59	2,69
10,8	0	2,70	2,66	**2,41**	2,76	2,70	2,66	**2,41**	2,76
	2	2,72	2,70	2,52	2,68	2,75	2,71	2,60	2,66
	4	2,80	2,73	2,45	2,64	2,74	2,67	2,60	2,69
	6	2,68	2,69	2,62	2,70	2,78	2,73	2,57	2,70
14,4	0	**2,64**	**2,76**	2,52	2,68	2,64	**2,76**	2,52	2,68
	2	2,71	2,65	2,72	2,71	2,74	2,69	2,55	2,66
	4	2,71	2,71	2,66	2,74	**2,92**	2,70	2,71	**2,76**
	6	2,76	2,70	2,55	2,64	2,75	2,72	2,64	2,74

Таблица 3

Прочность и твердость горячедеформированных порошковых материалов

Время обработки $\tau_р$, кс	Слэ, % от массы стружки	Прочность (МПа) / твердость (HRE)							
		Стружка Д16+никель (л.э.)				Стружка Д16+ферротитан (л.э.)			
		(+630)	(+630) +ПА	(-630)	(-630) +ПА	(+630)	(+630) +ПА	(-630)	(-630) +ПА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,8	0	145/91	110/66	188/115	144/85	145/91	110/66	188/114	144/85
	2	145/98	121/83	141/110	49/83	145/97	112/80	148/**115**	137/89

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	4	155/98	102/79	147/**119**	123/83	**233**/100	108/87	128/112	143/85
	6	204/100	110/77	49/118	106/79	137/96	97/74	139/112	131/82
3,6	0	110/100	80/79	94/110	149/87	110/100	80/79	94/110	149/87
	2	98/98	104/88	141/108	98/81	200/96	102/83	139/108	151/92
	4	100/99	131/86	0/111	126/89	147/97	116/82	172/109	176/92
	6	153/99	131/73	45/109	163/96	139/97	111/69	120/113	143/92
5,4	0	96/101	88/90	112/108	112/84	96/101	88/90	112/108	112/84
	2	155/97	125/89	0/108	153/92	127/101	102/68	190/108	145/95
	4	196/91	133/60	56/105	168/94	147/100	106/82	126/109	157/91
	6	137/96	123/71	0/105	149/90	129/103	90/80	151/112	145/90
7,2	0	186/102	113/80	149/113	141/93	186/102	113/80	149/113	141/93
	2	163/97	106/86	0/107	147/92	184/103	110/66	160/110	159/90
	4	157/97	94/91	0/99	100/89	101/101	80/57	153/114	99/92
	6	139/95	98/59	0/101	147/92	135/93	116/73	188/107	143/90
10,8	0	129/102	112/83	152/111	170/90	129/102	112/83	152/111	170/90
	2	149/100	108/58	**214**/107	141/88	138/101	108/72	166/109	151/91
	4	145/100	114/87	129/105	155/88	127/100	112/81	118/106	153/93
	6	78/99	125/84	92/100	74/99	37/99	92/86	57/107	72/92
14,4	0	104/83	110/77	0/*36*	143/88	104/83	110/77	0/*36*	143/88
	2	43/51	59/45	139/113	151/89	165/106	106/83	165/110	143/91
	4	43/50	67/48	78/107	151/91	196/105	110/86	148/109	153/92
	6	116/100	112/62	163/110	159/88	188/104	120/71	124/105	170/91

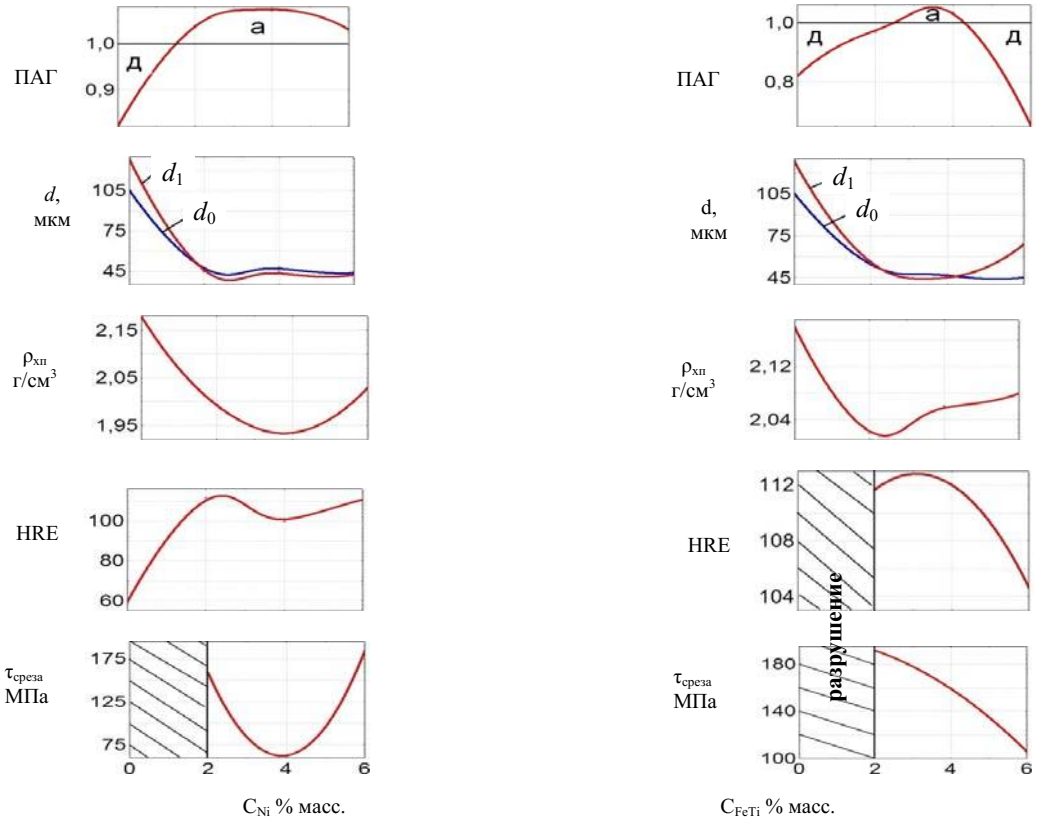


Рис. 4. Зависимости ПАГ, d_0, d_1, $\rho_{хп}$, HRE, $\tau_{среза}$ от:
а – C_{Ni} 6 % масс, б – C_{FeTi} 6 % масс при $\tau_р$ = 14,4 кс

Введение никеля изменяет средний размер частиц (рис. 4). Показано, что при увеличении до 2 % никеля наблюдается интенсивное снижение размера частиц. Переход от диспергирования к агломерации в процессе МХА наблюдался при 2 % никеля. При введении 4 % никеля степень агломерации плавно снижается до 6 % .

При введении никеля до 4 % происходит снижение плотности холоднопрессованной заготовки на основе стружкового порошка -630 мкм. Минимальные значения плотности холоднопрессованной заготовки для материала легированного никелем наблюдается при 4 % масс., а дальнейшее увеличение концентрации никеля приводит к повышению плотности заготовки. Максимальные значения твердости и прочности достигаются при введении в материал 2 % Ni.

При введении FeTi до 2 % масс. снижается средний размер частиц, дальнейшее увеличении концентрации стабилизирует средний размер частиц после МХА, а средний размер частиц после ручной обработки начинает увеличиваться от 4 % масс. При концентрации 2 % масс. FeTi установлен переход от диспергирования к агломерации в процессе МХА и переход от агломерации к диспергированию при 4 % масс.

Минимальные значения плотности холоднопрессованной заготовки для материала легированного ферротитаном наблюдается при 2 % масс. при дальнейшем увеличении концентрации FeTi происходит увеличение плотности заготовки. При 2 % масс. FeTi твердость и прочность образцов достигают максимальных значений, при увеличении концентрации легирующего элемента происходит их постоянное снижение.

В результате МХА получают композиционные частицы, плакированные $Al_4B_2O_9$ + AlB_{12}, $Al_4B_2O_9$, AlB_{12}, $AlBO_3$, за счет этих частиц снижается интенсивность окисления Al при предварительном нагреве в воздушной атмосфере при ДГП. Этим же можно объяснить и качество холоднопрессованных заготовок и горячедеформированных образцов [4].

Выводы

В результате проведенных исследований гранулометрического состава выявлено бимодальное распределение частиц по размерам, характеризующееся максимальным содержанием фракций с размером -63 мкм. Один максимум распределения находится при размере частиц менее 63 мкм, другой при размере частиц более 630 мкм, причем массовое содержание частиц с размерами менее 63 мкм составляет от 58 до 67 % (при времени размола 14,4 кс и содержании легирующих элементов 6 % масс.).

Оптимизировано содержание легирующих элементов (6 % масс.) и время размола (14,4 кс), обеспечивающие максимальный выход фракций размером -63 мкм. Построены 3D Spline модели зависимостей выхода фракций +630 мкм от времени размола и концентрации легирующих элементов. Выявлено влияние времени размола и концентрации легирующих элементов на механические свойства образцов. Установлен переход от диспергирования к агломерации при введении 2 % масс. легирующих элементов и времени размола 14,4 кс. Показано, что введения легирующих элементов изменяет средний размер частиц, при увеличении до 2 % легирующих элементов наблюдается интенсивное снижение размера частиц.

Из проведенных исследований показано, что минимальные значения плотности холоднопрессованных образцов у материалов с добавлением 4 % масс. Ni и 2 % масс. FeTi. При этом максимальные значения плотности горячештампованных материалов на основе активированной стружки наблюдаются у материалов с добавлением 4 % масс. легирующего элемента.

Выявлена взаимосвязь между размерами частиц, процессами диспергирования и агломерации и свойствами полученных материалов. В отличие от ранее полученных результатов, установлено наследственное влияние процессов диспергирования и агломерации на механические свойства. Показано, что максимальное значение прочности на срез и максимальная твердость при введении легирующих элементов обеспечивается переходом от диспергирования к агломерации. Так же установлено влияние легирующих добавок на механические свойства.

Разработана технология получения горячедеформированных материалов на основе измельченной стружки алюминиевого сплава Д-16. Технология включает механохимическую активацию стружки Д-16 в высокоэнергетической мельнице, отделение фракции более 630 мкм., приготовление шихты на основе стружкового порошка с добавлением порошка алюминия (50 % масс.), формование заготовки путем холодного прессования (455 МПа) с последующей горячей штамповкой (550 ^oC, 0,15 кс, 140 МДж/м^3), обеспечивающее получение материала с повышенными механическими свойствами на срез.

Литература

1. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов. – М., 1972.

2. *Гопиенко, В.Г.* Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Белавин. – М., 1993.

3. *Дорофеев, Ю.Г.* Кинетика механохимической активации стружки алюминиевого сплава Д-16, особенности уплотнения «стружкового» порошка и формирования полученного материала / Ю.Г. Дорофеев, Е.Н. Безбородов, С.Н. Сергеенко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 54 – 58.

4. *Дорофеев, Ю.Г.* Особенности формирования компактированного материала из механически активированной стружки алюминиевого сплава Д16 / Ю.Г. Дорофеев, Е.Н. Безбородов, С.Н. Сергеенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 2. – С. 31 – 33.

5. Материалы, получаемые методами порошковой металлургии из быстрозакаленных чешуек алюминиевого сплава 2024, содержащего переходные металлы. L i m Sugun, Sugamata Makoto, Kaneko Junichi. «Кэйкиндзоку, J. Jap. Inst. Light MelaIs.». – 1987. – 37. – № 10. – С. 690 – 697 (яп.; рез. англ.).

6. Особенности деформации сжатием нанокристаллических сплава Al-5ат. % Ti, полученных методом реакционного шарового размола в водороде и горячего прессования под сверхвысоким давлением. Compressive deformation behavior of nanocrystalline AL-5 at.% Ti alloys prepared by

reactive ball milling in H_2 and ultra-high-pressing. Voon Kyoung Il., Lee Kyung Sub. J. Alloys and Compounds. – 2002. – 333. – № 1 – 2. – С. 249 – 259.

7. Пат.4834942 США МКИ[4] С22 С 21/00. Процесс порошковой металлургии для получения высокотемпературного сплава алюминий-титан. Опубл. 30.05.89.

УДК 004.891, 002.53:004.89

О.И. Соловьева, А.В. Кожевников

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье предложена математическая модель прогнозирования уровня безопасности металлургического оборудования на основе статистических данных отказов его узлов, построенная с помощью нечетких множеств и генетических алгоритмов. С помощью данной модели могут быть созданы экспертно-аналитические системы оценки уровня безопасности металлургических агрегатов.

Машина непрерывного литья заготовок, нечеткая логика, генетический алгоритм, экспертная система оценки безопасности оборудования.

The paper proposes a mathematical prediction model of the security level of metallurgical equipment based on the statistics of failures of its components, built with the help of fuzzy sets and genetic algorithms. The expert-analytical systems of evaluation of the security level of metallurgical units can be created with the help of the model.

Continuous casting machine, fuzzy logic, genetic algorithm, expert system of evaluation of the security of equipment.

Непрерывная разливка является сложным технологическим процессом и характеризуется большим количеством взаимосвязанных физико-химических и механических закономерностей, недостаточно изученных в настоящее время. Сегодня не существует адекватных математических моделей, позволяющих осуществлять оценку состояния сталеразливочного оборудования в реальном масштабе времени на основе имеющегося (измеряемого) перечня параметров процесса.

Существующие физические и математические описания процессов непрерывной разливки обладают определенной неполнотой в силу недостаточной изученности причинно-следственных связей влияния параметров процесса на возможность появления, характер и степень проявления внезапных отказов и дефектов. Это обстоятельство осложняется невозможностью измерения одних параметров и неточностью (дрейфом) измерения других, как из-за ограниченных возможностей соответствующих датчиков, так и из-за непрерывного износа и периодической замены элементов оборудования в процессе работы машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Исходя из вышесказанного, актуальным является создание специализированной автоматизированной экспертной системы, прогнозирование состояния и уровня безопасности заготовки сталеразливочного оборудования путем применения правил распознавания одной из трех категорий («безопасно», «аварийный режим» и «требует специального осмотра и обследования») на основе совокупности технологических параметров процесса разливки и статистических данных об отказах узлов МНЛЗ.

Для достижения поставленной цели система реализует следующие функции:

- сбор данных, содержащих технологических параметры контролируемого процесса разлива и статистическое данные о ремонтах, ТО внеплановых остановках и отказах узлов МНЛЗ;
- обработку текущих параметров различными математическими методами;
- анализ результатов обработки и выработка прогноза состояния оборудования (распознавание категории);
- отображение и представление инженерно-техническим работникам металлургических производств контролируемых параметров и результатов прогноза состояния оборудования и уровня его безопасности.

Процедура прогноза состояния оборудования основана на математическом аппарате теории нечетких множеств. Использование такого подхода обусловлено следующими причинами.

1. Физико-химический и технологический процесс непрерывной разливки чрезвычайно сложен и близок к «черному ящику», поскольку не определены однозначные связи между параметрами процесса и дефектами, а также причинами отказов, к которым они приводят.

2. Измерения контролируемых параметров неточны не только из-за недостаточной разрешающей способности датчиков, но и в силу искажения этих результатов «шумами», вызванными неконтролируемыми возмущениями.

Математическая теория нечетких множеств – единственная теория, которая математически оперирует со смысловым содержанием слов человека и позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. Нечеткое множество строго определяется с