

- Третьяков В.И. Сплавы на основе тугоплавких металлов. Справочник по конструкционным материалам. Изд. МГТУ им. Н.Э Баумана, М., 2005, с. 416 ... 421.
- Элиот Р.П., Структуры двойных сплавов, Металлургия, М., 1970, 312 с.
- Термоэмиссионное преобразование энергии. Сборник докладов на II Международной конференции по термоэмиссионному преобразованию энергии. Изд. АН СССР, 1969, М., с. 458 ... 463.

### **Особенности формообразования дисков газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с применением физической модели жидкофазного спекания гранул**

к.т.н., с.н.с. Бурлаков И.А.,  
«НИИД», ФГУП ММПП «Салют»

Опробование комплекса технологий изготовления модельных заготовок дисков ГТД методом жидкофазного спекания из гранул сплава ЭП741НП было проведено на трех капсулах массой 1,5 кг. Капсулы представляли собой контейнеры цилиндрической формы, заполненные гранулами сплава ЭП741НП размером от 50 - 160 мкм, заваренные в вакууме (остаточное давление  $10^{-4}$  мм рт. ст.) после их термической дегазации и виброуплотнения.

Капсулы обрабатываются по трем технологическим схемам, включающим:

- жидкофазное спекание + горячее изостатическое прессование;
- горячее изостатическое прессование + жидкофазное спекание;
- горячее изостатическое прессование.

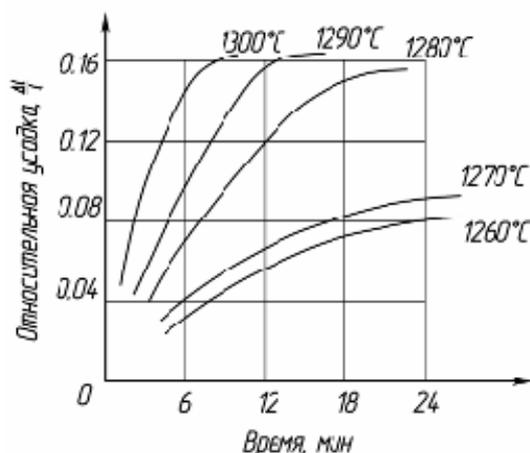
Для определения рациональных режимов жидкофазного спекания была разработана физическая модель жидкофазного спекания гранул жаропрочных никелевых сплавов [1].

Для изучения кинетики спекания порошковых жаропрочных никелевых сплавов фракций 100 – 160 – 315 мкм использовалась свободная засыпка гранул в керамическую форму и предварительно спеченные (при температуре 1150°С) образцы. В первом случае усадка материала в форме контролировалась периодически, а во втором случае – осуществлялась непрерывная киносъемка. С помощью планирования экспериментов было получено уравнение регрессии для сплава ЭП741НП ( $X_1$  – температура,  $X_2$  – время спекания,  $X_3$  – гранулометрический состав в интервале 45 – 315 мкм).

$$Y_{\text{ЭП741НП}} = 9,82 + 5,62X_1 + 0,87X_2 + 0,11X_3,$$

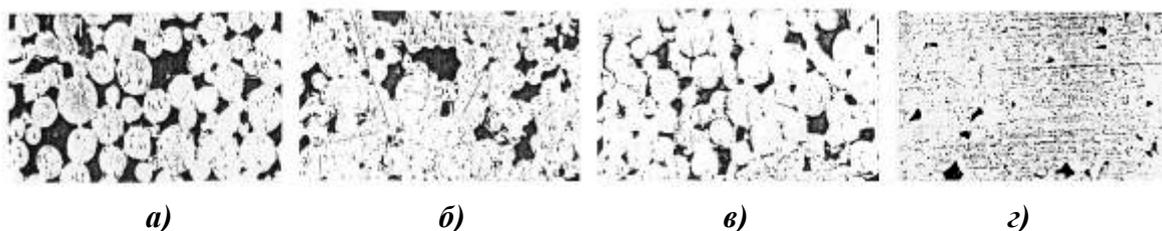
где  $Y$  – изменение линейного размера ( $\frac{\Delta l}{l}$ ).

Из уравнения видно, основными параметрами, влияющими на процесс жидкофазного спекания, являются температура и время спекания.



**Рис. 1. Кинетика жидкофазного спекания гранул ЭП741НП**

Результаты исследования кинетики спекания порошковых сплавов при непрерывном замере изменения линейных размеров показаны на рис. 2.



**Рис. 2. Кинетика спекания сплава ЭП741НП (а – спекание в течение 1 мин., б – спекание в течение 2 мин., в – спекание в течение 3 мин., з – спекание в течение 5 мин.)**

С учетом данных, полученных при изучении кинетики жидкофазного спекания, были изготовлены образцы для исследований. При их испытании на растяжение (ГОСТ1497-84) после проведения жидкофазного спекания и газостатирования (технологическая схема № 1) были получены следующие результаты (табл. 1).

*Таблица 1.*

**Механические характеристики сплава ЭП741НП после жидкофазного спекания и газостатирования**

№ образца	$\sigma_{0,2}$ (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	101,9	119,8	6,2	14,3
2	101,2	122,2	7,0	12,8
3	98,6	120,8	6,0	12,1

Исследования микроструктуры сплава показали, что в материале наблюдаются поры и керамические включения с выкрашиваниями. Максимальный размер поры достигал 100 мкм, причем они были расположены по границам зерен. Величина зерна составляла 50 - 200 мкм.

Результаты испытания образцов (ГОСТ1497-84) на растяжение при температуре (20±10) °С после проведения операции газостатирования и жидкофазного спекания (технологическая схема № 2) близки данным, полученным на образцах, полученных по первой схеме (табл. 2).

*Таблица 2.*

**Механические характеристики сплава ЭП741НП после газостатирования и жидкофазного спекания**

№ образца	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	107,7	134,6	6,6	9,3
2	92,8	130,6	10,9	17,7
3	99,9	125,9	7,5	14,2

Исследования микроструктуры сплава показали, что микроструктура образца плотная, без несплошностей. Величина зерна составляла 20 – 150 мкм.

Результаты испытания образцов (ГОСТ1497-84) на растяжение при температуре 20±10°С после проведения операции газостатирования (технологическая схема № 3) ниже данных, полученных по предыдущим схемам (табл. 3).

*Таблица 3.*

**Механические характеристики сплава ЭП741НП после газостатирования**

№ образца	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	85,1	91,2	0,6	5,9
2	100,8	107,1	3,9	20,0
3	92,6	95,1	1,1	7,8
4	86,8	87,6	0,3	7,8
5	98,5	99,9	1,3	12,1

Деформация заготовок. В нашем случае было решено исключить мощное прессовое оборудование и разработать новую технологию, базирующуюся на ГИП, жидкофазном спе-

кании, горячей осадке и изотермической раскатке. Заготовка массой 32 кг первоначально подвергалась ГИП, а потом спекалась с жидкой фазой с последующими отжигом, осадкой и изотермической раскаткой.

Высокотемпературный отжиг проводился по следующему режиму: нагрев до 1165 °С, выдержка при этой температуре в течение 2 часов и охлаждение до 1000 °С.

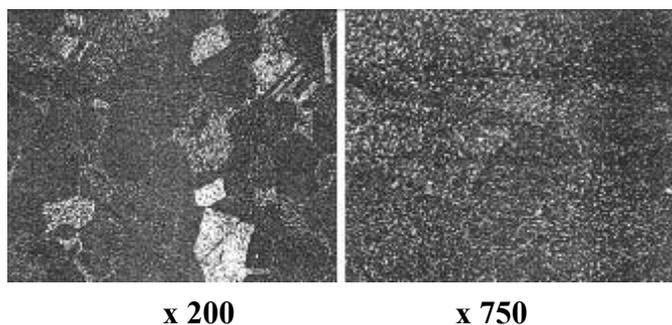
Осадка осуществлялась на прессе модели ПА2642 с изотермическим блоком УИДИН 400М, нагретым до температуры 920 °С. Температура осадки не превышала 1120 °С. На последних этапах многостадийной осадки наблюдалось заметное снижение напряжения течения материала, что указывало на формирование в заготовке мелкокристаллической структуры. Это стало возможным благодаря наличию в структуре материала  $\gamma'$ - фазы в количестве около 10%. В завершающей стадии шайба, полученная осадкой, подвергалась изотермической раскатке на промышленном дискораскатном стане. Результаты исследований статических свойств и длительной прочности (табл. 4) показывают существенное повышение механических характеристик металла, подвергнутого изотермической раскатке.

Исследование микроструктуры (рис. 3) показало, что структура мелкодисперсная, и межгранульного разрушения не обнаружено. При этом крупные включения разрушаются и приобретают свойства элементов упрочнения детали. Важно отметить, что до настоящего времени ни зарубежных, ни отечественных публикаций по данному вопросу найдено не было. Суммарная деформация гранульной заготовки составила 72% [2]. Полученные результаты могут явиться основой новой промышленной технологии получения дисков ГТД с повышенными эксплуатационными характеристиками (ресурсом) (на 10 – 20% - по прочностным характеристикам и до 50% - по пластическим свойствам) из гранульных материалов, позволяющей существенно экономить металл (до 2-х раз). Разработанная технология защищена патентами.

Таблица 4.

**Результаты исследований статических свойств и длительной прочности**

Место вырезки образцов	Механические свойства при T = 20 °С						Длительная прочность при T=650 °С и $\sigma=100$ кгс/мм <sup>2</sup>
	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_s$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Дотп, мм	Ак, кгс·м/мм <sup>2</sup>	
Нераскатанная зона	139,2	100,3	16,2	20,0	1,60	4,6	-
Раскатанная зона	146,3	98,8	25,0	26,2	1,60	5,1	14855 - снят



**Рис. 3. Микроструктура раскатанного диска из ЭП741НП.**

**Литература**

1. Самойлов О.И. Теоретическое обоснование процессов и технологии контролируемого спекания порошковых карбидосодержащих смесей и распыленных многокомпонентных жаропрочных сплавов. Диссерт. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. М., 1991.
2. Самойлов О.И., Бурлаков И.А., Поклад В.А. Изготовление заготовок из никелевого сплава ЭП741НП методом изотермического многопереходного деформирования. «Физика и техника высоких давлений», 2007, том 17, № 2.