

PACS: 81.30.-t

В.А. Гейкин, О.И. Самойлов, И.А. Бурлаков, Ф.Е. Артемов

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ГРАНУЛЬНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

НИИД ФГУП ММП «Салют»  
пр. Буденного, 16, г. Москва, 105118, Россия  
E-mail: burlakov@salut.ru

*Получены неразъемные соединения методом жидкофазного спекания в вакуумной печи с нагревом электросопротивлением и с нагревом электронным лучом. Результаты положены в основу разрабатываемой промышленной технологии изготовления дисков газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных гранульных сплавов.*

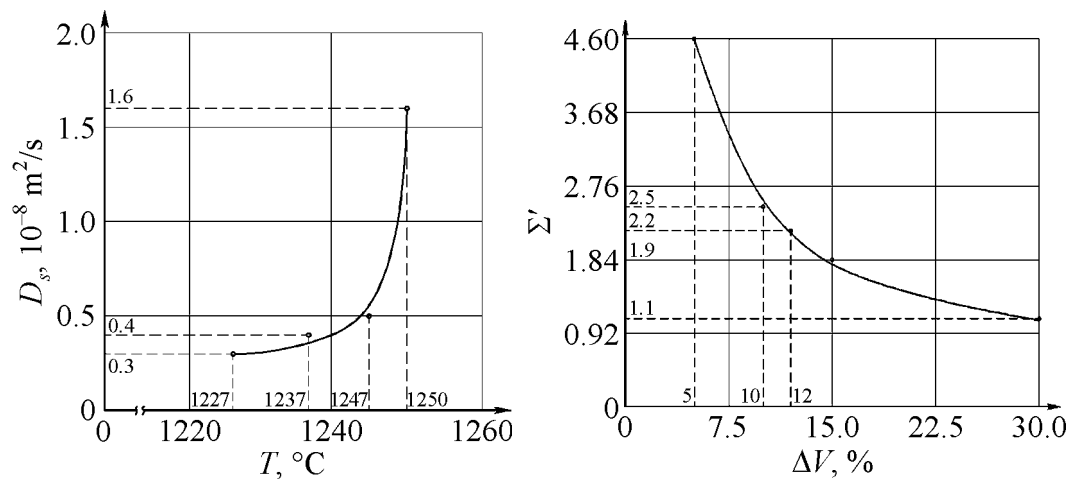
**Ключевые слова:** гранульные сплавы, жидкофазное спекание, газотурбинный двигатель, изостатическое прессование, неразъемное соединение

Для снижения массы газотурбинного двигателя и улучшения его тактико-технических характеристик необходима замена болтового соединения гранульных дисков барабана компрессора высокого давления ГТД неразъемным. С целью повышения свариваемости гранульных материалов нами был предложен метод получения неразъемных соединений с применением жидкофазного спекания под давлением. При этом был учтен многолетний опыт США и России в изготовлении гранульных заготовок дисков ГТД, указывающий на то, что заготовки после горячего изостатического прессования (ГИП) необходимо подвергать пластической деформации с целью получения высоких прочностных свойств соединения заготовок [1]. С учетом прочностных свойств сплавов типа ЭП741НП для деформации требуется давление на уровне 1600 МПа. Ввиду того, что температурный интервал такой деформации составляет 1150–1170°C, возникает необходимость создания специальной штамповой оснастки, масса которой может достигать 0.5 t и выше. Высокая стоимость материала формообразующей оснастки приводит к тому, что расходы на технологическую подготовку производства превышают эффект от экономии жаропрочного материала и увеличения ресурса диска.

Для получения необходимой деформации заготовки нами была использована свободная осадка материала без бокового подпора. Предыдущий опыт показал, что свободная осадка материала, имеющего гранульную структуру, уже при степени деформации 4–5% приводит к разрушению материала [2].

Технология жидкофазного спекания жаропрочных сплавов типа ВЖ136, ЭП741П, ЭП741НП, ВЖ122, ЭП97 была разработана еще в 80-е годы в НИИД [3]. При жидкофазном спекании, благодаря большей подвижности системы, более наглядно проявляется действие основных движущих сил объемного уплотнения (капиллярного стягивания), более активны процессы перегруппировки элементов структуры и локализации уплотнения. Интенсивно протекают процессы гетеродиффузии, растворения и осаждения, что приводит к ускорению сплавообразования и объемного уплотнения.

Для правильного выбора режимов жидкофазного спекания важным является определение коэффициента диффузии (рис. 1) и объема жидкой фазы (рис. 2).



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента диффузии никеля  $D_s$  от температуры при твердофазном спекании гранул сплава ЭП741НП

**Рис. 2.** Зависимость коэффициента перестройки порядка частиц  $\Sigma'$  от объема жидкой фазы  $\Delta V$  при жидкофазном спекании свободно засыпанных в керамическую форму гранул ЭП741НП

Вследствие реализации описанного процесса изменяется структура обрабатываемого материала, и деформация осуществляется (как нами было установлено) в результате проскальзывания не только между частицами, но и по кристаллографическим плоскостям. Отработку технологического процесса получения неразъемных соединений осуществляли методами жидкофазного спекания в вакуумной печи с нагревом: 1) электросопротивлением, 2) электронным лучом.

### Получение неразъемного соединения с помощью метода жидкофазного спекания в вакуумной печи с нагревом электросопротивлением

Для этого эксперимента с учетом результатов, полученных путем анализа рассмотренной выше модели жидкофазного спекания, были изготовлены два образца прямоугольного сечения из сплава ЭП741НП [4]. Поверхности об-

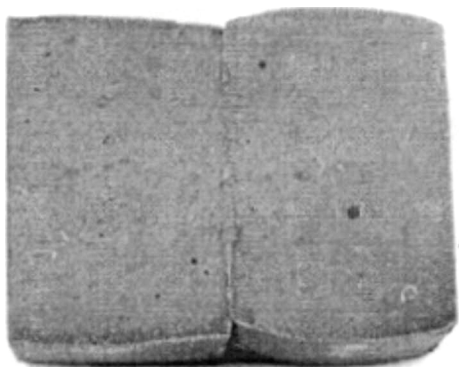


Рис. 3. Образец, полученный методом жидкофазного спекания

разцов были отшлифованы на наждачном круге, после чего «обезжирены» этиловым спиртом. Для лучшего примыкания поверхностей образцы между собой были зафиксированы нихромовой проволокой и помещены в вакуумную печь с глубиной вакуума  $10^{-4}$  mm Hg. Температура нагрева составляла 1230–1300°C, время выдержки образцов в печи достигало 20 min (рис. 3). Контроль температуры осуществляли с помощью термовизора.

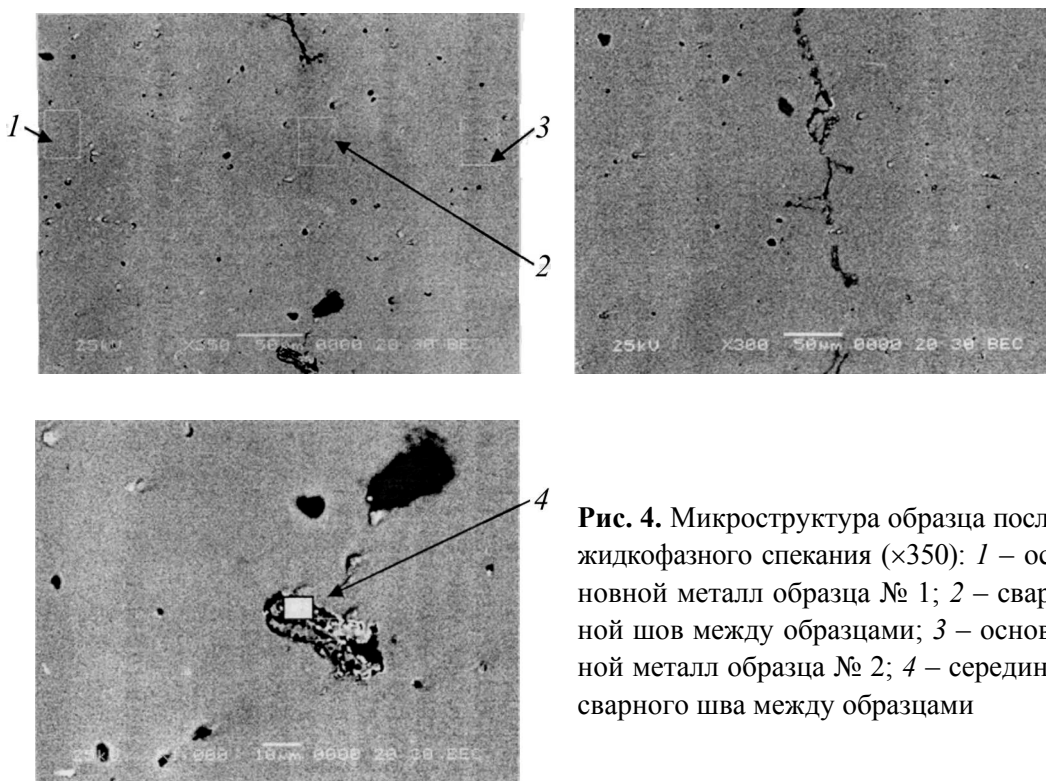
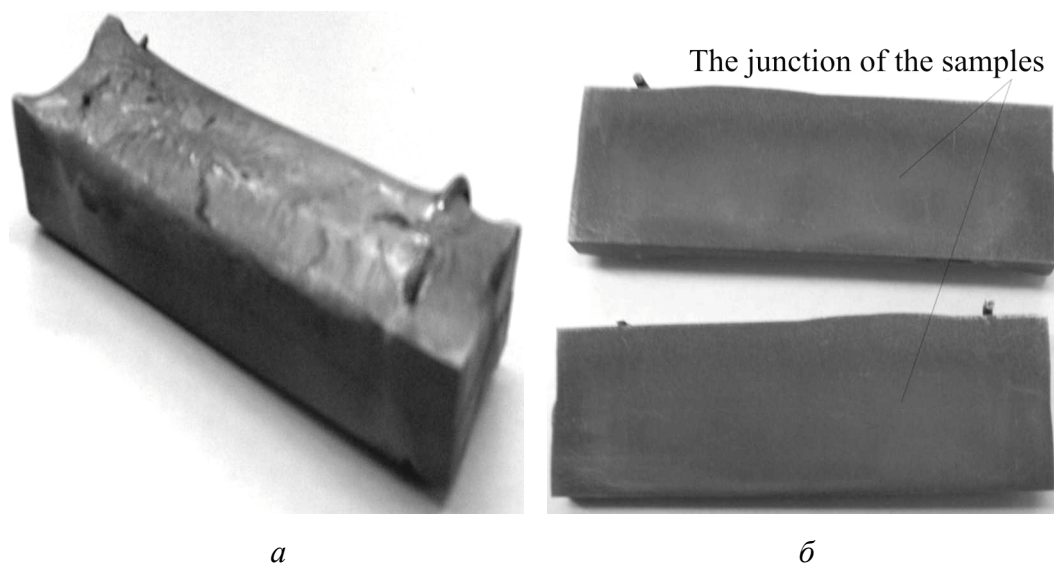


Рис. 4. Микроструктура образца после жидкофазного спекания ( $\times 350$ ): 1 – основной металл образца № 1; 2 – сварной шов между образцами; 3 – основной металл образца № 2; 4 – середина сварного шва между образцами

Исследование полученных образцов показало, что на их отдельных участках соединения наблюдается диффузия материала (рис. 4). В месте соединения образцов в материале имеются отдельные поры размером 10–30  $\mu\text{m}$ . В середине соединения образцов выявлены окисные включения, микроструктура материала сварных соединений образцов без оплавлений границ.

#### Получение неразъемного соединения с помощью метода жидкофазного спекания в вакуумной печи с нагревом электронным лучом

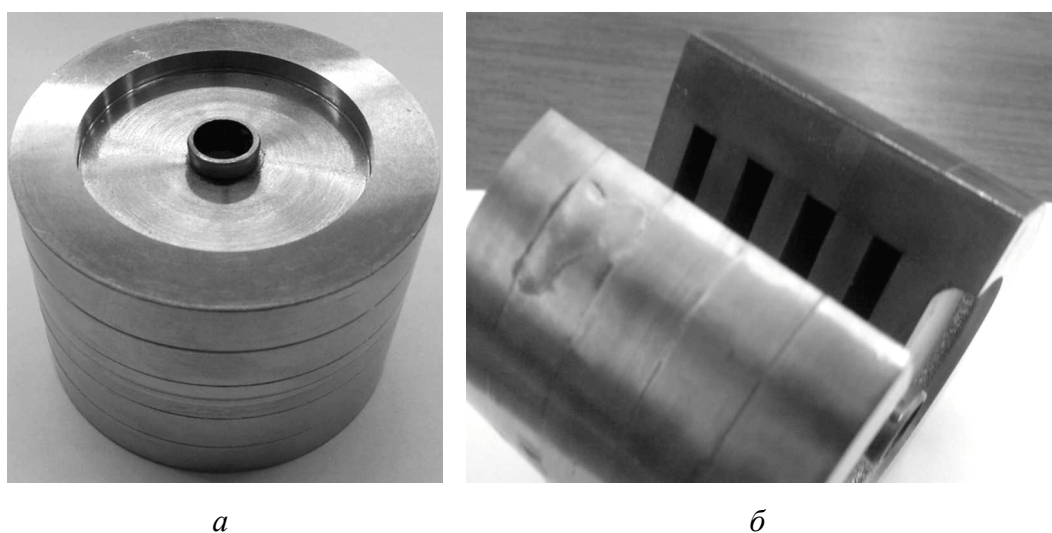
Для эксперимента также изготовлены два образца прямоугольного сечения из гранульного сплава ЭП741НП (рис. 5) по описанной выше методике.



**Рис. 5.** Образец после жидкофазного спекания в вакуумной печи с нагревом электронным лучом (*a*) и после электроэрозионной резки (*б*)

Изучение микро- и макроструктуры, механических свойств образцов в области соединения показало удовлетворительные результаты. С учетом полученных данных методом жидкофазного спекания был изготовлен модельный барабан (рис. 6). Заготовку в виде цилиндра диаметром 200 mm, массой 70 kg после ГИП подвергали жидкофазному спеканию, после чего осаживали до диаметра 570 mm (рис. 7).

В процессе осадки формировалась мелкозернистая структура с размером зерна до 15  $\mu\text{m}$ , благодаря чему напряжение течения материала плавно снижалось, достигая 70% от исходного.



**Рис. 6.** Образец модельного барабана после жидкофазного соединения (*a*) и после резки (*б*)



**Рис. 7.** Заготовки барабана ГТД диаметром 570 mm из сплава ЭП741НП после жидкофазного спекания

после жидкофазного спекания без пластической деформации и после пластической деформации методом горячей изотермической раскатки.

Пластичность материала готовой детали достигала 20–21.4% (при норме  $\geq 13\%$ ), а временное сопротивление разрыву – 1500 МПа. При испытании на разрыв перед разрушением исследуемых образцов в зоне соединения наблюдалось образование пор, что подтверждает наличие механизма разрушения пластичных сплошных металлов.

Полученные результаты положены в основу разрабатываемой промышленной технологии изготовления дисков ГТД из жаропрочных гранульных сплавов. Планируется изготовление барабанов из заготовок, подвергнутых жидкофазному спеканию без пластической деформации и после пластической деформации методом горячей изотермической раскатки.

### Выводы

1. Показана принципиальная возможность изготовления барабанов ГТД путем безболтового соединения дисков из сплава ЭП741НП спеканием жидкой фазой под давлением в вакуумной печи с нагревом как электросопротивлением, так и электронным лучом.

2. Выполненные исследования механических свойств неразъемных соединений дисков из сплава ЭП741НП методом жидкофазного спекания под давлением показали перспективность данного метода.

3. Образование пор перед разрушением исследуемых образцов в зоне соединения при испытании на разрыв подтверждает наличие механизма разрушения пластичных сплошных металлов.

4. Показано, что жидкофазное спекание позволяет существенно снизить давление при формообразовании гранульных заготовок и создании неразъемных соединений.

1. *А.Г. Братухин*, Современные авиационные материалы, Авиатехинформ XXI в., Москва (2001).
2. *М.З. Ерманок, Ю.П. Соболев, Л.С. Буславский*, КШП № 12, 21 (1977).
3. *О.И. Самойлов*, Дисс. ... д-ра техн. наук, Москва (1991).
4. *О.И. Самойлов, В.А. Гейкин, И.А. Бурлаков, В.А. Поклад*, Заготовительные производства в машиностроении № 7, 12 (2010).

*В.А. Гейкін, О.І. Самойлов, І.А. Бурлаков, Ф.Є. Артемов*

## МЕТОД ЗНИЖЕННЯ ВИСОКОГО ТИСКУ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ ЗАГОТОВОК ІЗ ГРАНУЛЬНИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Отримано нерознімні з'єднання методом рідкофазного спікання у вакуумній печі з нагрівом електроопором і з нагрівом електронним променем. Результати покладено в основу розробленої промислової технології виготовлення дисків газотурбінних двигунів (ГТД) із жароміцних гранульних сплавів.

**Ключові слова:** гранульні сплави, рідкофазне спікання, газотурбінний двигун, ізо-статичне пресування, нерознімні з'єднання

*V.A. Gejkin, O.I. Samoilov, I.A. Burlakov, F.E. Artyomov*

## METHOD OF HIGH-PRESSURE REDUCTION AT DEFORMATION OF BILLETS MADE OF GRANULAR HEAT-RESISTANT ALLOYS

Permanent connections have been obtained by the method of liquid-phase sintering in a vacuum furnace using resistance heating and heating with electronic beam. The results formed the basis of developed industrial technology of gas turbine engines (GTE) disks made of heat-resistant granular alloys.

**Keywords:** granular alloys, liquid-phase sintering, gas turbine engine, isostatic pressing, permanent connection

**Fig. 1.** Temperature dependence of nickel diffusion coefficient  $D_s$  at solid phase sintering of granules of EP741NP alloy

**Fig. 2.** The coefficient of order reorganization of  $\Sigma'$  particles as a function of the liquid phase volume  $\Delta V$  at liquid-phase sintering of EP741 granules freely filled up into a ceramic form

**Fig. 3.** A sample obtained by liquid-phase sintering

**Fig. 4.** The microstructure of the sample after liquid-phase sintering ( $\times 350$ ): 1 – base metal of sample № 1; 2 – weld seam between the samples; 3 – base metal of sample № 2; 4 – the center of the weld seam between the samples

**Fig. 5.** The sample after the liquid-phase sintering in a vacuum furnace with electronic beam (a) and after the wire edming (b)

**Fig. 6.** A sample of model drum after the liquid-phase connection (a) and after the cutting (b)

**Fig. 7.** GTE drum billets of 570 mm in diameter made of EP741NP alloy after the liquid-phase heating