

УДК 669.245

Б.С. Ломберг

**ПРОИЗВОДСТВО СТЯЖНЫХ БОЛТОВ И СИЛОВЫХ ТЯГ ИЗ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «БУРАН»**

*Приведены результаты разработки технологии изготовления стержневых болтов и силовых тяг из высокожаропрочного никелевого сплава ЭП962-ИД для изделия «Бурани».*

**Ключевые слова:** высокожаропрочный сплав, прессование, термическая обработка, механические свойства.

*Results of development of a technology for manufacturing couplings bolts and drive rods from Ni-based superalloys for «Buran» spaceship are described.*

**Key words:** Ni-based superalloys, extrusion, heat treatment, mechanical properties.

При изготовлении «Бурана» возникла потребность в применении стержневых болтов и силовых тяг из материалов, обладающих высокой прочностью при растяжении в сочетании с удовлетворительной пластичностью, высокими показателями жаропрочности и сопротивления малоциклового усталости. Этот комплекс свойств должен был обеспечить надежную работоспособность конструкций в процессе эксплуатации при температурах 550–750°C.

Предъявляемым к силовым тягам и стержневым болтам требованиям отвечал разработанный в 1980-х годах в ВИАМ для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и рекомендованный для тяжело нагруженных деталей жаропрочный никелевый сплав ЭП962-ИД (авторы: Б.С. Ломберг, В.Г. Галкина, В.Г. Склярченко), содержащий 45% упрочняющей  $\gamma'$ -фазы [1–3]. Но до этого из сплава ЭП962-ИД изготавливались только штамповки дисков ГТД. По прочностным характеристикам ( $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} = 1550\text{--}1600$  МПа) сплав ЭП962-ИД превосходил существующие в то время жаропрочные сплавы, из которых изготавливались болты ( $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} = 1250\text{--}1300$  МПа).

Исходя из заданных конструкторами размеров стержневых болтов и силовых тяг, следовало получить прутки диаметром 35 мм, а детали, изготовленные из него, должны были работать при 600°C и выдерживать высокие напряжения. Для решения этой трудной задачи на Ступинском металлургическом комбинате (СМК) была сформирована комплексная бригада – от ВИАМ в ней участвовали Б.С. Ломберг, В.Г. Галкина, Д.Е. Герасимов, Ю.В. Малашенко, от СМК – М.П. Юшкин, Н.С. Рахманов, А.В. Кашеева, Н.П. Панин. Была поставлена задача разработать и освоить в промышленности технологию получения прутков из сплава ЭП962-ИД, в сжатые сроки осуществить поставку требуемого количества прутков основному изготовителю орбитального корабля «Бурани» – НПО «Молния».

Особенности деформации сплава ЭП962-ИД при получении заготовок дисков были известны

достаточно хорошо. Диски изготавливались методом осадки с последующей штамповкой на вертикальных прессах. Прутки же из существующих сплавов изготавливали методомковки или прокатки в зависимости от требуемых размеров и марки сплава. Однако применить эти методы для производства прутков из высокопрочного сплава ЭП962-ИД не представлялось возможным.

Для изготовления прутков из этого сплава удалось разработать современную технологию их получения методом прессования на горизонтальных прессах на Ступинском металлургическом комбинате.

В вакуумной индукционной печи выплавляли сплав ЭП962-ИД. Из него отлили расходные электроды диаметром 110 мм для последующего вакуумного дугового переплава (ВДП) в слитки диаметром 140 мм. Затем при температуре 1120°C слитки отпрессовали с коэффициентом вытяжки 11 на горизонтальном прессе 2400 тс. Полученные прутки были разрезаны на мерные заготовки и обточены до диаметра 35 мм. После прессования прутки обладали однородной, плотной, мелкозернистой макроструктурой (рис. 1). Помимо разработки нового способа деформации, при изготовлении прутков потребовалось разработать специальные режимы термообработки, которые должны были обеспечить получение стержневых болтов и силовых тяг, отвечающих требованиям технического задания [4].

Для разработки режима термической обработки, обеспечивающего оптимальный комплекс механических свойств, была определена температура полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, которая составила 1150°C.

Исследованы микроструктура и механические свойства при закалке из двухфазной и однофазной области (рис. 2, табл. 1 и 2).

Микроструктура прутков после закалки из двухфазной области мелкозернистая (8–9 балл), наблюдаются укрупненные частицы  $\gamma'$ -фазы, т. е. в процессе закалки не произошло полного растворения упрочняющей фазы (см. рис. 2, а). Закалка из однофазной области вызывает рост зерна до 3–4 балла

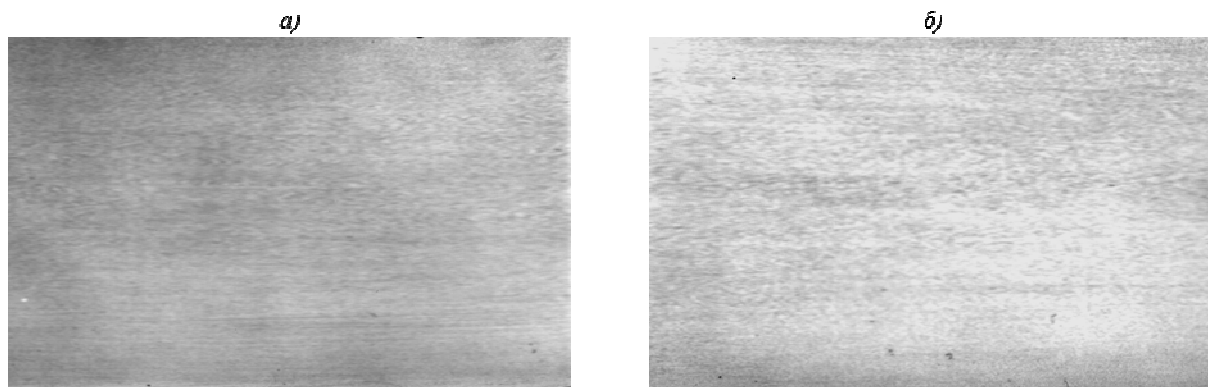


Рис. 1. Макроструктура прессованных прутков диаметром 45 мм из сплава ЭП962-ИД в исходном состоянии (а и б – две плавки)

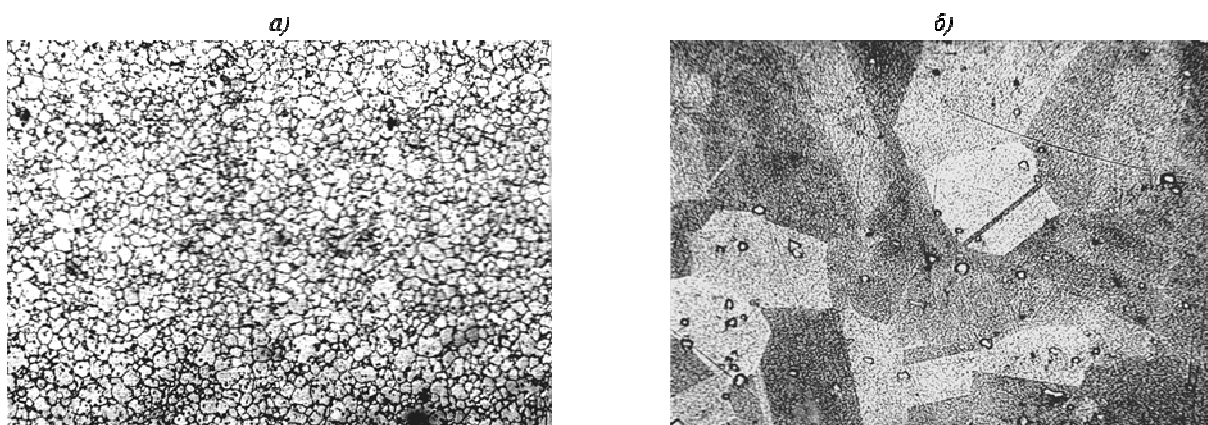


Рис. 2. Микроструктура (×100) прессованных прутков диаметром 45 мм из сплава ЭП962-ИД после термообработки: а – закалка из двухфазной области (1120°С); б – закалка из однофазной области (1160°С)

Таблица 1

Влияние режимов термообработки на свойства прутков сплава ЭП962-ИД

Режим термообработки		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ: $d_{отп}$ , мм	Длительная прочность при 600°С: долговечность $\tau$ , ч, при $\sigma$ , МПа	
Закалка	Старение	МПа		%				1220	1250
1050°С, 8 ч (воздух) + 1120°С, 4 ч (воздух)	850°С, 6 ч (воздух) + 760°С, 16 ч (воздух)	1670–1700	1260–1270	13–15	16–17	25–26	2,92	232*–297	(330–470)*
1080°С, 8 ч (воздух) + 1150°С, 6 ч (воздух)	То же	1500	1010–1040	17–19	19	40–41	3,08	231–105	180–240*
Нормы ТУ 1-80-256–80		≥1550	≥1050	≥10	≥12	≥25	–	≥100	–

\* Образцы сняты без разрушения.

Таблица 2

Влияние режимов термообработки на кратковременные свойства при повышенной температуре (600°С)

Режим термообработки		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
Закалка	Старение	МПа		%	
1050°С, 8 ч + 1120°С, 4 ч (воздух)	850°С, 6 ч + 760°С, 16 ч (воздух)	1670	1170–1200	16,4–16,8	17,5–18,2
1080°С, 8 ч + 1150°С, 4 ч (воздух)	То же	1440	900–910	12,0–12,2	13,9–15,3

(см. рис. 2, б) и полное растворение  $\gamma'$ -фазы. Поэтому в структуре наблюдается только мелкодисперсная  $\gamma'$ -фаза, выделяющаяся при старении.

Для создания равномерных условий рекристаллизации структуры перед закалкой был введен предварительный нагрев при 1050–1080°C [5].

При закалке из однофазной области происходит снижение прочностных характеристик (см. табл. 1), которые не достигают требуемых в техническом задании значений ( $\sigma_{в} \geq 1550$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 1050$  МПа), и некоторое повышение пластичности. Такая же закономерность изменения механических свойств наблюдается при температуре 600°C (см. табл. 2).

При закалке из двухфазной области весь комплекс свойств соответствует требованиям технического задания.

По результатам данной работы на Ступинском металлургическом комбинате была разработана и освоена промышленная технология выплавки, прессования и термообработки прутков диаметром 35–45 мм из высокожаропрочного никелевого сплава ЭП962-ИД для крепежных деталей и силовых тяг изделия «Буран».

Разработанная технология производства прутков обеспечила требования технического задания заказчика.

До этого в металлургической практике из высокопрочных сплавов прутки для заготовок высоконагруженных деталей не изготавливали. Коллективу авторов сплава и сотрудникам СМК удалось решить эту, казалось бы частную, но, тем не менее, весьма непростую задачу.

В соответствии с выпущенной технической документацией (ТУ 1-801-256–80, ТР-175–80 на термообработку) на КБ «Молния» была поставлена партия высококачественных прутков массой 600 кг, успешно прошедшая испытания на изделия.

Стяжные болты и силовые тяги из сплава ЭП962-ИД успешно выдержали стендовые и летные испытания, что обеспечило надежный полет «Бурана». Проведенная работа имела важное значение при последующих разработках во ФГУП «ВИАМ» деформируемых жаропрочных сплавов, особенно при назначении режимов термической обработки. Впервые примененная закалка из двухфазной области позволила получить повышенную прочность материала при сохранении удовлетворительной пластичности и высоких характеристик жаропрочности. Эти результаты были широко использованы в дальнейших исследованиях специалистами ВИАМ [6–9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы для новых и перспективных ГТД /В сб. Металлические материалы. М.: ОНТИ-ВИАМ. 1977. №1. С. 8–25.
2. Галкина В.Г., Ломберг Б.С., Складенко В.Г., Щербаков А.И. Разработка высокопрочного дискового сплава ЭП962 (ВЖ122) /В сб. Авиационные материалы. М.: ОНТИ-ВИАМ. 1982. №1. С. 9–26.
3. Ломберг Б.С. Жаропрочные деформируемые сплавы и материалы для дисков ГТД. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: 1994. С. 258–264.
4. Ломберг Б.С., Галкина В.Г., Подольский М.С., Арбина В.П. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочного сплава ВЖ122 (ЭП962) //Авиационная промышленность. 1980. №7. С. 48–49.
5. Ломберг Б.С., Галкина В.Г. Влияние микроструктуры на характеристики высокожаропрочного сплава ЭП962 //Авиационная промышленность. 1985. №4. С. 5–7.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. 7–17.
7. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
9. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.