



ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ НИКЕЛЕВЫХ СУПЕРСПЛАВОВ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Л. В. ЧЕРВЯКОВА**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. ДЕВИД, **Дж. ВИТЕК**, доктора (OAK Ridge National Laboratory, USA)

Описаны работы по оценке свариваемости суперсплавов на основе никеля, применяемых при изготовлении лопаток газовых турбин. Содержание упрочняющей γ -фазы в сплавах достигает 60 %. Предложена технология восстановления лопаток методом плазменно-порошковой наплавки.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, никелевые суперсплавы, лопатки газовых турбин, упрочняющая γ -фаза, провал пластичности, технология восстановления

Основными сплавами с высокими высокотемпературными механическими свойствами, используемыми для изготовления газотурбинных двигателей, являются суперсплавы на основе никеля. Поскольку в последние годы требования к температуре эксплуатации двигателей значительно повысились, модификации сплавов привели к увеличению в микроструктуре никелевых сплавов упрочняющей γ -фазы (более 45 %). Удовлетворяя эксплуатационным свойствам, эти материалы имеют плохую свариваемость (при сварке и термообработке они склонны к образованию горячих трещин).

Настоящая работа выполнена в рамках Украинско-американского проекта по партнерству «Ремонтная сварка и пайка компонентов двигателей и паровых турбин» за счет средств УНТЦ. С американской стороны в проекте приняли участие OAK Ridge National Laboratory, OAK Ridge, Tennessee United States (U.S.) Department of Energy's, Pratt and Whitney-Paton, с украинской — Институт электросварки им. Е. О. Патона и Международное объединение «Интерм».

Цель проекта — усовершенствование и внедрение ремонтных технологий сварки и пайки компонентов из суперсплавов на основе никеля, используемых в авиадвигателях и наземных газовых турбинах, что дает возможность уменьшить расходы на их восстановление и изготовление. Для исследований выбраны сплавы ЧС-70 и ЖС-26, применяемые сегодня при производстве лопаток газовых турбин наземных установок и авиационных двигателей.

Сплав ЧС-70 относится к суперсплавам на никелевой основе с упрочнением γ -фазой, количество которой достигает 50...55 %. При литье обеспечивается равноосная структура, гарантирующая после соответствующей термообработки (аустени-

зации и старения) высокие прочностные (в том числе при повышенных температурах) свойства.

Сплав ЖС-26 является сплавом на никелевой основе с высоким количеством элементов, способствующих образованию γ -фазы. Среднее содержание фазы достигает 60...65 %. Специальная технология литья обеспечивает направленную кристаллизацию в лопатке. Термообработка состоит в аустенизации для устранения междендритной неоднородности (при 1265 °С) и старения. После старения образуются упрочняющие γ -фазы с градиентированной кубической решеткой и оптимальным размером 0,3...0,5 мкм преимущественно кубической формы.

Химический состав и механические свойства сплавов ЧС-70 и ЖС-26 приведены в таблице. Никелевые суперсплавы являются сложнотермически стабильными материалами, имеющими в составе ряд элементов, ограниченно растворимых в γ -твердом растворе. Значительная химическая неоднородность металла и развитие термомеханических процессов способствуют образованию при сварке плавлением дефектов типа горячих трещин [1]. Для количественной оценки свариваемости использовали динамическое деформирование свариваемых образцов на испытательной установке типа Vareststraint Test [2]. При этом возможна оценка пластичности металла шва в температурном ин-

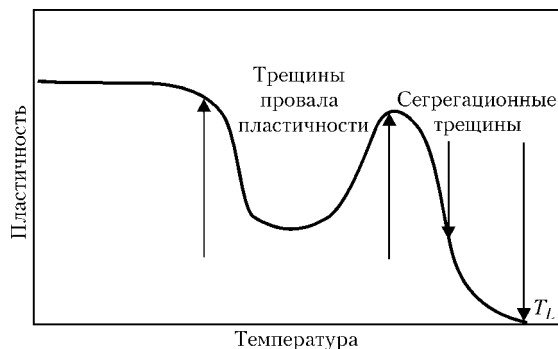


Рис. 1. Зависимость температуры от пластичности металла шва с зонами образования сегрегационных трещин и трещин провала пластичности



Химический состав и механические свойства сплавов ЧС-70 и ЖС-26 при кратковременном растяжении

Марка сплава	Массовая доля элементов, %											
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ce	Fe	B
ЧС-70	Основа	0,6...0,12	15...16,7	9,5...12,5	1,5...2,5	4,5...6,5	2,4...3,2	4,2...5,0	0,10...0,25	0,05	≤ 0,8	≤ 0,2
ЖС-26	»»	0,13...1,18	4,3...5,6	8,0...10,0	0,8...1,4	10,9...12,5	5,5...6,2	0,8...1,2	1,1...1,8	0,025	1,0	0,015

Продолжение таблицы

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Механические свойства			
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %
ЧС-70	20	850	750	3	Не опр.
	600	960	Не опр.	6	9,3
	900	Не опр.	»»	Не опр.	Не опр.
ЖС-26	20	860...930	790	8...16	11...13
	800	910...1030	760...890	8...18	9...20
	900	850...880	840	16...21	19...23



Рис. 4. Внешний вид установки для исследования линейного расширения металлов

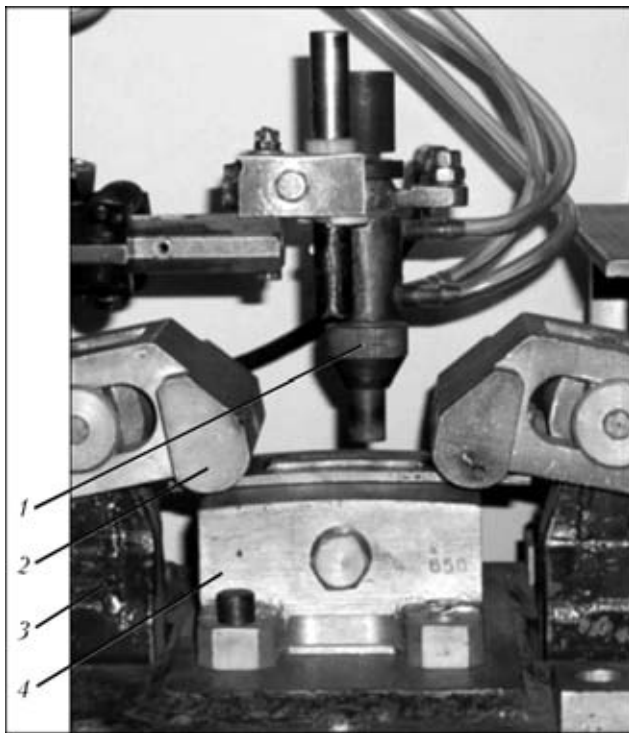


Рис. 2. Внешний вид рабочего угла установки и составного образца (оправки для изгиба радиусом 650 мм): 1 — горелка ТИГ; 2 — зажим; 3 — образец; 4 — оправка

тервале «температура кристаллизации — комнатная температура». Обобщающая кривая изменения пластичности приведена на рис. 1. Учитывая, что конструктивные элементы из рассматриваемых материалов могут быть получены только литьем и имеют



Рис. 3. Внешний вид образца из сплава ЧС-70 после высокотемпературных испытаний

ограниченные размеры, для исследований использовали составные образцы.

Внешний вид рабочего узла установки для проведения опытов по оценке свариваемости сплавов приведен на рис. 2. Толщина испытуемых образцов составляла 1,7 мм. Проплавление образцов при испытаниях осуществляли сваркой ТИГ на следующем режиме: $I_{св} = 70$ А; $U_{д} = 10,5$ В; $v_{св} = 8,5$ м/ч; расход аргона 10 л/мин.

При исследовании литых образцов сплава ЖС-26 с направленной кристаллизацией в области сварного шва и металле ЗТВ находился монокристалл с направлением {001}. Высокотемпературные механические свойства металла оценивали на установке АЛА-ТОО, принцип действия которой аналогичен испытательной машине «Сleeb1».

Испытания проводили в вакуумной камере. Внешний вид образца после испытаний приведен на рис. 3. Рабочую часть образца исследуемых материалов вваривали в плоские захваты. Благодаря такой конструкции образца при необходимости возможна оценка свойств металла из пера реальной лопатки. При исследовании лопаток, бывших в эксплуатации, предварительно проводили восстановительную термообработку и таким образом оценивали свариваемость металла.

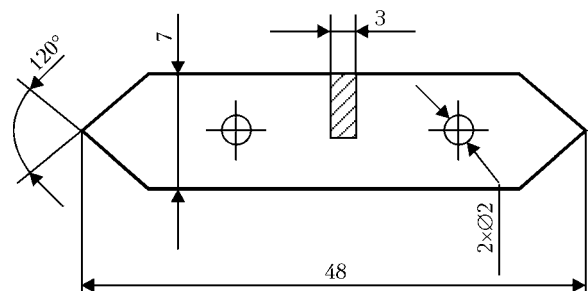


Рис. 5. Схема образца для проведения dilatометрических исследований

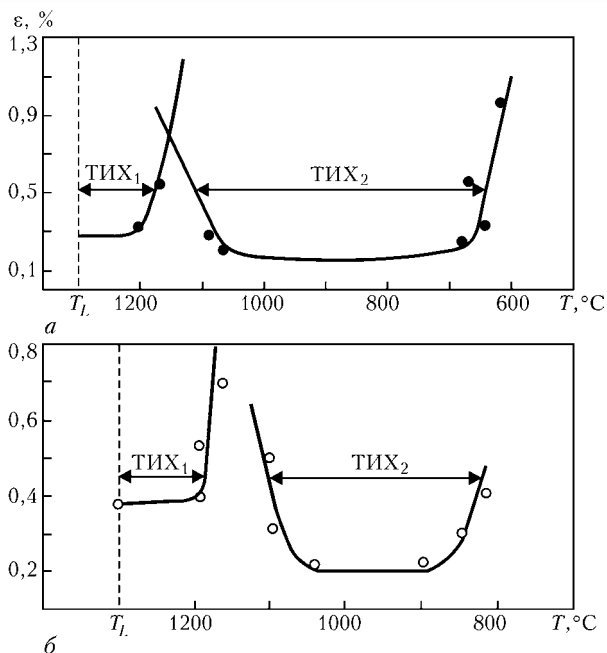


Рис. 6. Высоко- (ТИХ₁) и низкотемпературные (ТИХ₂) интервалы хрупкости сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б)

Важнейшей характеристикой, определяющей кинетику термомеханического состояния в области сварочной ванны, является коэффициент линейного расширения металла, определяющий его объемные изменения при нагреве и остаточные напряжения. Коэффициент линейного расширения определяли на специализированной дилатометрической установке бесконтактным методом, что обеспечивает высокую точность измерений вплоть до температуры плавления.

Внешний вид установки для исследования линейного расширения металлов и схема образца при-

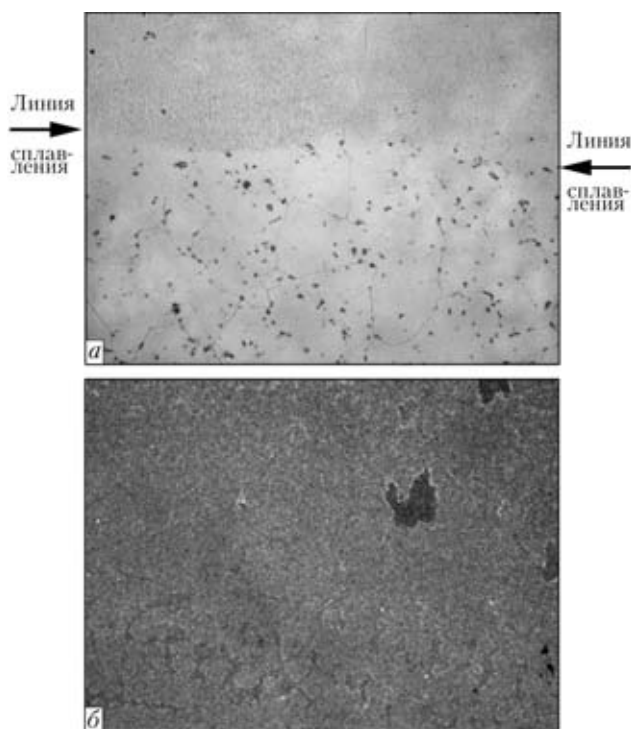


Рис. 7. Микроструктура металла шва (X100) при сварке сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б)

ведены соответственно на рис. 4 и 5. В результате металлографических исследований, выполненных с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии, построены температурные интервалы хрупкости (ТИХ) сплавов ЧС-70 и ЖС-26 (рис. 6). Анализ кривых, полученных на сплаве ЧС-70 с равноосной структурой показывает, что наблюдается тенденция повышения критической величины деформации в ТИХ₁. При этом свариваемость сплава определяет поведение металла шва в ТИХ₂. В еще большей мере эта особенность проявляется при оценке свариваемости сплава ЖС-26. Кроме того, пороговые значения деформации в ТИХ₁ и ТИХ₂ для сплава ЖС-26 выше соответствующих параметров сплава ЧС-70, несмотря на более сложную систему легирования сплава ЖС-26. Можно предложить, что это связано с условиями кристаллизации обоих сплавов. У сплава ЧС-70, имеющего равноосную структуру, в шве обычная структура равноосных кристаллов с наличием вытянутых зерен, растущих от полуплавленных зерен основного металла. Наблюдаются большеугольные границы зерен, по которым проходят преимущественно горячие трещины.

При сварке сплава ЖС-26 с направленной структурой, когда в области выполнения сварного шва находится практически монокристалл, в шве происходит наследование структуры основного металла. Отсутствуют границы зерен, являющиеся источниками хрупкого межзеренного разрушения [3, 4]. В результате пластичность металла шва в ТИХ₁ и ТИХ₂ повышается. Характерные структуры металла швов, подтверждающие такие представления, приведены на рис. 7. Они подтверждаются также сравнительными исследованиями вы-

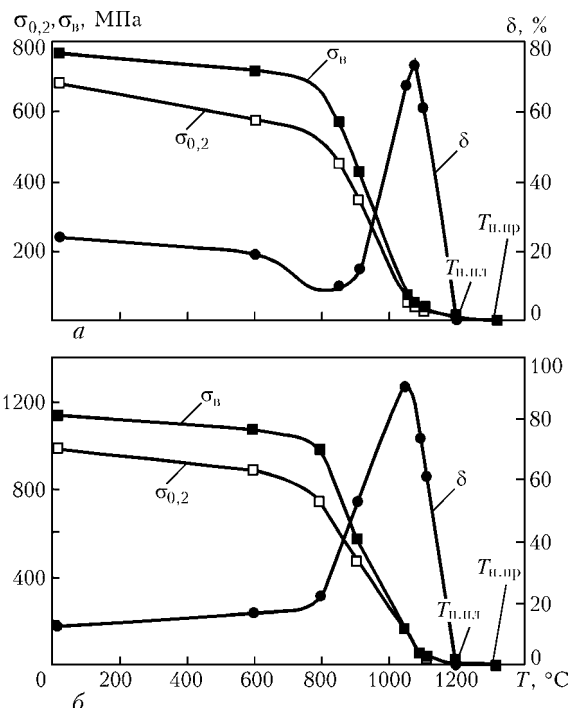


Рис. 8. Зависимость прочности и пластичности металла швов соединений сплавов ЧС-70 (а) и ЖС-26 (б) от температуры (Т_{н.пр}, Т_{н.пл} — температура соответственно нулевой прочности и пластичности)

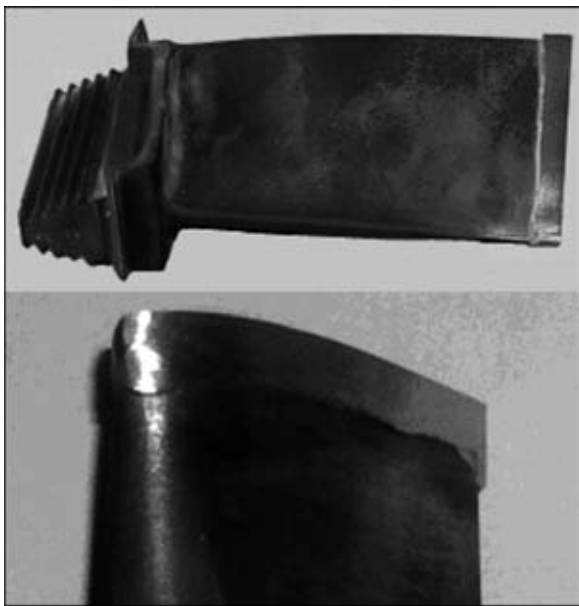


Рис. 9. Внешний вид лопаток газовых турбин, восстановленных сваркой

сокотемпературных механических свойств металла швов (рис. 8) соединений суперсплавов ЧС-70 и ЖС-26 на установке АЛА-ТОО типа «Cleebl».

Выполнение технологических проб на исследуемых сплавах путем заварки сварных образцов на пластинах размерами 5×50×80 мм показало, что сплав ЖС-26 в меньшей мере подвержен образованию горячих трещин по сравнению со сплавом ЧС-70, что подтверждают данные о свариваемости этих сплавов.

Значительный объем исследований в проекте занимает компьютерное моделирование термомеханических процессов в области сварного шва при сварке никелевых суперсплавов ЧС-70 и ЖС-26, а также вклад структурных изменений в металл ЗТВ на динамику изменения таких процессов. Структурные исследования выполняли на высокотемпературном лазерном дилатометре.

Результаты измерения коэффициента термического расширения образцов сплавов показывают, что значительный вклад в термическое расширение металла при нагреве оказывает $\gamma \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$ превращение, проходящее с увеличением объема. Такая закономерность возможна, когда межплоскостные расстояния γ' -фазы меньше, чем соответствующие параметры матрицы с аустенитной структурой. Максимальные значения коэффициента термического расширения при температурах, близких к T_S , составляют для сплава ЧС-70 и ЖС-26 соответственно $60 \cdot 10^{-6}$ и $44 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Эти реальные показатели заметно превышают табличные данные и определяют развитие значительных упругопластических деформаций.

Расчет таких деформаций реализован с использованием разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона

The paper describes studies on evaluation of weldability of nickel-base superalloys, applied in manufacture of gas turbine blades. The content of the strengthening γ' -phase in the alloys reaches 60 %. A technology is proposed for blade reconditioning by plasma-powder surfacing.

компьютерной программы, учитывающей значения реальных физических свойств, в том числе приведенных выше значений коэффициента термического расширения. Расчет выполняли для суперсплава ЧС-70 и для сравнения для стабильноаустенитной высоколегированной стали, не претерпевающей фазовых превращений при нагреве и охлаждении. Анализ полученных результатов показал, что в металле ЗТВ сплава под действием термического цикла сварки развиваются значительные пластические деформации, суммарное значение которых с учетом двухосного напряженного состояния может превышать показатели пластичности сплава и приводить к образованию трещин при сварке [5].

Опробована ремонтная сварка лопаток газовых турбин из сплава ЧС-70 (рис. 9). Исследование микроструктуры наплавленного металла показало отсутствие дефектов. Механические свойства на отремонтированных участках модельных образцов показали, что свойства металла шва приближаются к характеристикам основного металла.

Выборочную партию лопаток, отремонтированную по разработанной технологии, подвергали циклическим испытаниям на динамическом стенде с целью определения предела усталости таких лопаток. Усталостные испытания, проведенные на резонансной частоте пера лопатки, показали, что отремонтированные лопатки обладают хорошей работоспособностью.

Выводы

1. Выполнены исследования свариваемости суперсплавов на основе никеля применительно к лопаткам газовых турбин.
2. Разработана промышленная технология восстановления лопаток газовых турбин с использованием плазменно-порошковой наплавки.

Участники проекта выражают особую признательность сотрудникам Украинского научно-технологического центра за постоянную помощь в обеспечении и выполнении этого проекта.

1. Sims C. T., Stoloff N. S., Hagel W. C., Superalloys II. — New York: Wiley-Interscience publ., 1995. — 384 p.
2. Savage W. F., Lundin G. D. The Vareststraint test // Welding J. — 1965. — 44, № 10. — P. 433-442.
3. Буханова А. А., Толорайя В. Н. О структуре и свойствах монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе. — М.: Наука, 1984. — С. 213-217.
4. Stray grain formation in single crystal Ni-base superalloy welds / I. W. Park, S. S. Babu, I. M. Vitek et al. // J. Appl. Phys. — 2003. — 94, № 6. — P. 4203-4209.
5. Влияние физических характеристик литых никелевых жаропрочных сплавов на развитие термомеханических процессов при сварке плавлением / В. С. Савченко, К. А. Юценко, В. И. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 11. — С. 6-9.

Поступила в редакцию 09.09.2004