

# ОЦЕНКА КРАТКОВРЕМЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЯ ТРУДНОСВАРИВАЕМЫХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ТИПА ЖС6

**К.А. Ющенко, А.В. Яровицын, Н.О. Червяков, А.В. Звягинцева, И.Р. Волосатов, Г.Д. Хрущов**  
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Разработана методика оценки кратковременных механических свойств сварного соединения «основной–наплавленный металл» трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6 при высоких температурах, имитирующего восстановление кромок рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей при их серийном ремонте. Обоснована, исходя из условия обеспечения технологической прочности такого сварного соединения, необходимость предельного уменьшения по сравнению с действующей нормативно-технической документацией размеров сварных заготовок и образцов для механических испытаний. Разработанная методика опробована на сервогидравлической машине MTS-810 при испытаниях образцов. Она позволила обосновать выбор режимов предварительной термической обработки с целью получения оптимальных прочностных свойств наплавленного металла ЖС6К. Библиогр. 19, табл. 4, рис. 7.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка, рабочие лопатки ГТД, ремонт бандажных полок, трудносвариваемый никелевый сплав, сварное соединение, технологическая прочность, подготовка образцов, механические свойства, высокая температура

Более 10 лет микроплазменная порошковая наплавка используется для серийного ремонта деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов [1–4], в частности, восстановления кромок рабочих лопаток турбины высокого давления толщиной 1,0...3,5 мм. Применение в условиях производства данного процесса однослойной дуговой наплавки характеризуется следующей областью энергетических параметров, где не проявляется склонность данных материалов к образованию трещин в процессе сварки плавлением и последующей термической обработки [5–7]: сила сварочного тока 2...35 А; эффективная тепловая мощность дуги 50...600 Вт; погонная энергия с учетом эффективного КПД нагрева изделия 400...2000 Дж/мм.

Кратковременные механические свойства сварного соединения «основной–наплавленный металл» при температуре эксплуатации детали авиационного ГТД, включающие значения предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , предела прочности  $\sigma_b$  и относительного удлинения  $\delta$  материала, являются первичными показателями надежности разрабатываемой технологии. Принято считать, что для условий восстановления бандажных полок рабочих лопаток ТВД следует обеспечивать в диапазоне температур их эксплуатации уровень кратковременных прочностных свойств сварного соединения не менее 0,6 относительно основного металла. Важную роль

при обеспечении данных требований, особенно в случае необходимости наплавки более чем одного слоя, играет рациональный выбор химического состава и режимов последующих термических обработок наплавленного металла.

Целью данной работы являлась разработка методики определения высокотемпературных свойств сварного соединения «основной–наплавленный металл» системы ЖС6У–ЖС6К (табл. 1) из трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов применительно к задаче восстановления бандажной полки рабочей лопатки с Z-образным профилем одного из современных ГТД (рис. 1), где предварительно методами капиллярного и металлографического (рис. 2) контроля в зоне наплавки установлено отсутствие трещин.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– проанализировать известные и действующие нормативно-технические документы (НТД), регламентирующие порядок подготовки образцов сварных соединений для последующего определения их кратковременных механических свойств;

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) по основным легирующим элементам никелевых жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ и ЖС6К-ВИ согласно ОСТ 190126-85

Сплав	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti
ЖС6У-ВИ	0,13...0,20	8,0...9,5	Основа	9,5...10,5	5,1...6,0	2,0...2,9
ЖС6К-ВИ	0,13...0,20	9,5...12,0	"-"	4,0...5,5	5,0...6,0	2,5...3,2

**Окончание табл. 1.**

Сплав	Mo	W	Nb	Fe	Mn	Si	B
ЖС6У-ВИ	1,2...1,4	9,5...11,0	0,8...1,2	<1,0	<0,4	<0,4	<0,035
ЖС6К-ВИ	3,5...4,8	4,5...5,5	1,4...1,8	<2,0	<0,4	<0,4	<0,02



Рис. 1. Внешний вид опытной рабочей лопатки турбины из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У, восстановленной микроплазменной порошковой наплавкой сплава ЖС6К: *а* — характеристики зоны ремонта; *б* — внешний вид наплавленной бандажной полки с Z-образным профилем; *в* — внешний вид восстановленной бандажной полки после механической обработки и капиллярного контроля

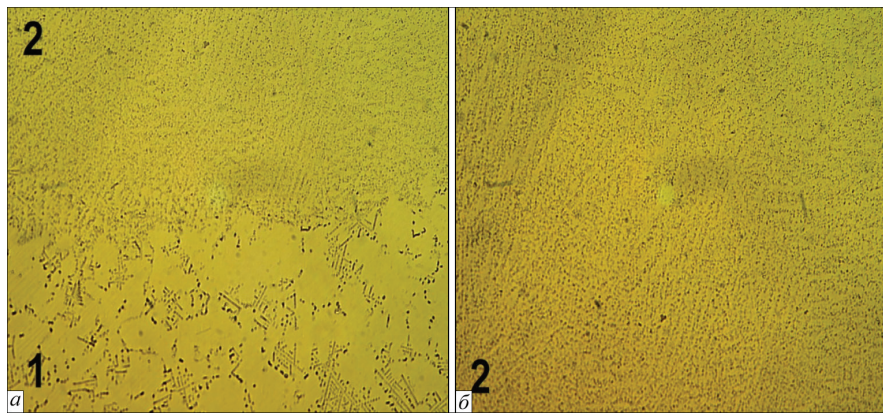


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) соединения «основной (1) — наплавленный (2) металл» восстановленной бандажной полки (система ЖС6У-ЖС6К): *а* — линия сплавления; *б* — наплавленный металл ЖС6К

– аргументировать выбор формы и размеров образца для испытаний на статическое растяжение при температуре 1000 °С и, соответственно, исходной сварной заготовки;

– при температуре испытаний 1000 °С исследовать закономерности изменения показателей кратковременных механических свойств типовых зон сварного соединения «основной–наплавленный металл» системы ЖС6У-ЖС6К при различных режимах их термической обработки.

Установлено, что новые национальные гармонизированные [9–12] и международный [13] стандарты при оценке кратковременных свойств сварных соединений при повышенных температурах предполагают использование:

– для наплавленного металла шва при продольном растяжении цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 8 и более мм; габаритным диаметром их захватной части 12 и более мм и общей длиной образца более 77 мм;

– для сварных соединений при их поперечном растяжении кроме указанных выше цилиндрических образцов — плоские образцы толщиной от 3,0 до 8,3 мм с шириной захватной части 35 мм и общей длиной образца 190...215 мм.

Ранее действовавший в нашей стране ГОСТ 6996 [8] (до 01.01.2019) для оценки кратковременных механических свойств наплавленного металла по сравнению с новыми национальными гармонизированными стандартами [9–12] дополнительно предполагал использование цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 3 и 6 мм; габаритным диаметром их захватной части 6 и 12 мм и общей длиной образцов 30...86 мм.

Также в проанализированных НТД [9–13] для оценки кратковременных механических свойств наплавленного металла требуется использовать сварные заготовки значительной толщины: стыковые швы с толщиной основного металла 12 мм [9, 10]; с общей шириной и высотой валика соответственно 20 и более 30 мм [8].

Адекватность требований, перечисленных выше в НТД [8–13], применительно к наплавленному металлу трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава ЖС6К, проверялась на серии технологических проб ввиду наличия для сварных соединений никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы ограничений по уровню тепловложений в изделие и объему наплавленного металла [7, 14, 15]. Проверка технологических проб на наличие трещин

Таблица 2. Особенности обеспечения технологической прочности в сварных соединениях с участием наплавленного металла трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава ЖС6К

Номер пробы	Тип наплавки/сварки	$\delta$ , мм	Тип ОМ	$B$ , мм	$H$ , мм	$L$ , мм	$V_n$ , см <sup>3</sup>	Обеспечение технологической прочности в процессе	
								наплавки/сварки	последующей т/о
1	УП	2,0	ЖС6У	3...5	5	40...45	0,60...1,13	+	+
2	УП	2,5...3,0	ЖС6У	4...6	12...15	40...45	1,92...4,50	+	+
3	УП	5,0	ЖС6У	7...8	5...7	50	1,75...2,80	+	+
4	УП	1,8...2,5	ЖС6У, ЖС6К	4...6	10...14	140...210	5,60...17,60	–	–
5	УП	2,0-3,0	Ауст. нерж. сталь	5...7	25...30	50...70	6,25...14,70	+	+
6	УП	2,0-3,0	Ауст. нерж. сталь	5...7	35...40	50...70	8,75...19,6	+	–
7	Пл	2,0	ЖС6К	5...7	2...3	50...70	0,50...1,47	–	–
8	Ш	1,5-2,0	ЖСЗДК	5...7	2...3	50...70	0,40...1,31	–	–
Ожидаемые результаты									
9	УП	12-20	ЖС6, ауст. нерж. сталь	14...20	$\geq 30$	$\geq 80$	$\geq 3,6$	–	–
10	Ш	12-16	ЖС6У	12...16	2...3	$\geq 150$	$\geq 26,8$	–	–

Примечание. УП, Пл, Ш — наплавка на узкую подложку, пластину и сварной шов соответственно;  $\delta$  — толщина (ширина) основного металла (ОМ);  $B$ ,  $H$ ,  $L$  — ширина, высота и длина наплавленного валика (в случае сварного шва — усиление валика);  $V_n$  — объем наплавленного металла.

в основном и наплавленном металле осуществлялась как визуально (при увеличении до  $\times 10$ ), так и капиллярным контролем. Полученные и ожидаемые результаты такой проверки представлены в табл. 2, схема наплавки технологической пробы на узкой подложке и пример ее внешнего вида в виде наплавки на узкую подложку — на рис. 3.

Установлено, что после превышения некоторого объема наплавленного валика из трудносвариваемого жаропрочного сплава ЖС6К (в первую очередь характеризующегося высотой  $H$  более 35 мм при длине наплавленного валика  $L = 50...70$  мм и  $H > 5$  мм при  $L \geq 140$  мм) в нем возникают трещины повторного нагрева. Соответственно, ввиду наличия трещин валик наплавленного металла ЖС6К такого объема не может иметь приемлемого уровня механических свойств, в том числе при высоких температурах. Схожая ситуация возможна в случае выполнения сварных швов или наплавки на пластину.

В то же время показано, что при ограничении длины наплавленного валика менее 50...70 мм возможна многослойная наплавка сплава ЖС6К без нарушения технологической прочности соответствующего сварного соединения в следующих случаях:

- при толщине основного металла ЖС6У  $\delta = 2,5...3,0$  мм на высоту не менее 12 мм;
- при толщине основного металла ЖС6У  $\delta = 5,0$  мм на высоту не менее 5 мм;
- при толщине основного металла из аустенитной нержавеющей стали на высоту до 30 мм.

Установленная область обеспечения технологической прочности в сварном соединении «ос-

новной–наплавленный металл» с участием наплавленного металла ЖС6К по объему наплавки в 2,5...13 раз превышает необходимый объем наплавленного металла на реальном изделии — рабочей лопатке турбины авиационного ГТД.

Исходя из изложенного выше можно сделать следующие выводы. Реализация требований НТД [9–12] применительно к испытаниям на статиче-

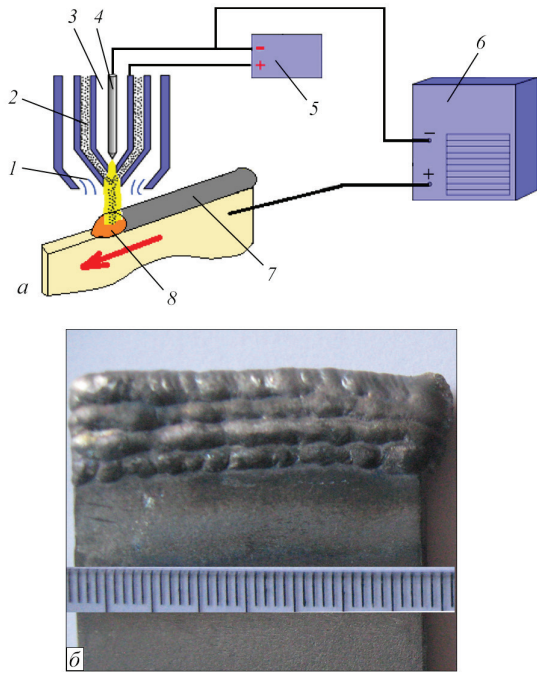


Рис. 3. Схема микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку (а) и внешний вид соответствующей технологической пробы при многослойной наплавке (б) (1 — защитный газ; 2 — транспортирующий газ и порошок; 3 — плазмообразующий газ; 4 — W-электрод; 5 — источник питания дежурной дуги; 6 — источник питания микроплазменной дуги; 7 — наплавленный валик; 8 — сварочная ванна



ское растяжение при температуре 1000 °С соединений с участием трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава ЖС6К может привести к неоправданному повышению технических требований к мощности разрывной машины; размеров специализированных захватов для высокотемпературных испытаний; расхода дорогостоящего материала никелевого жаропрочного сплава на сварные заготовки; трудоемкости непосредственного изготовления образцов для механической обработки. Однако главной причиной нерациональности требований НТД [9–12] является то, что воспроизведение процесса подготовки и выполнения стыкового сварного соединения трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава типа ЖС6 толщиной 12...16 мм приведет к значительному увеличению необходимой мощности микроплазменной дуги и многократному увеличению уровня действующих растягивающих напряжений и деформаций в процессе прохождения сварочного термомеханического цикла. По предварительным оценкам потребуется увеличение силы сварочного тока не менее чем в 5...10 раз по сравнению с реальным режимом восстановительной наплавки рассматриваемой лопатки, что, в большинстве случаев, ведет к нарушению теплового режима работы применяемого плазмотрона и требует, как минимум, разработки его новой модели для увеличенной мощности микроплазменной дуги. В то же время в данных условиях с высокой вероятностью прогнозируется нарушение технологической прочности такого соединения с образованием в его зоне трещин в процессе сварки плавлением или последующей термической обработки.

Таким образом, основные положения разрабатываемой методики оценки кратковременных механических свойств при высоких температурах (1000 °С) для соединения «основной–наплавленный металл» трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы можно сформулировать следующим образом.

1. Геометрические размеры исходной сварной заготовки и область значений энергетических показателей режимов для ее подготовки должны соответствовать возможности выполнения в соответствующем соединении условия обеспечения технологической прочности (отсутствуют трещины) в процессе сварки плавлением и последующей термической обработки.

2. Область значений энергетических показателей режимов для подготовки сварной заготовки, характеризующих мощность микроплазменной дуги и суммарные погонные тепловложения в изделие, должна быть максимально близка к реальным режимам наплавки и, соответственно, значениям показателей тепловложений в изделие

планируемой технологии восстановления кромки рабочей лопатки авиационного ГТД.

3. Геометрические размеры и форма образца для механических испытаний выбираются таким образом, чтобы из исходной сварной заготовки определенных предельных размеров, где не проявляется склонность трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава к образованию трещин, можно было изготовить один или несколько таких образцов.

4. Геометрические размеры и форма отдельного образца для механических испытаний выбираются таким образом, чтобы обеспечивались минимальный расход дорогостоящего материала, техническая возможность и приемлемая трудоемкость его изготовления; рационально использовалась мощность испытательной машины и выполнялись условия длительного ресурса работы захватов испытательной машины.

Для обеспечения изложенных выше требований предложен плоский образец с оптимизированным сечением рабочей части (рис. 4, а), изготавливаемый электроэрозионной резкой. С целью уменьшения габаритов захватной части образца введена система промежуточных переходников к захватам (рис. 4, б) испытательной сервогидравлической машины МТС-810 (максимальное усилие разрыва 3 т). Новый образец, в отличие от регламентированных в НТД [8–12], позволил устранить критическое превышение толщины и

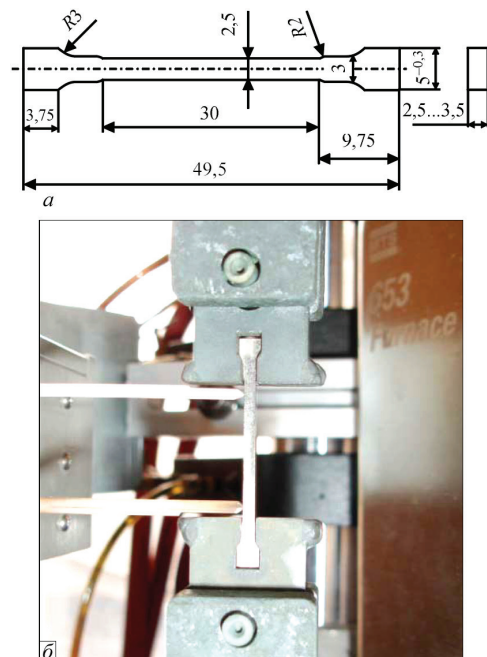


Рис. 4. Форма и размеры плоского пропорционального образца для оценки кратковременных механических свойств трудносвариваемого наплавленного металла ЖС6К при высоких температурах (а) и внешний вид специализированных переходников к захватам испытательной сервогидравлической машины МТС-810 (б)

Таблица 3. Сравнение выполнения базовых требований для образца согласно рис. 4 к его форме и размерам в международной [13] и отечественной НТД [16, 17]

ГОСТ 1497-84 [16]	Выполнение условий	ДСТУ EN 10002-1:2006 [17]	Выполнение условий	ISO 6892-1:2016(E) [13]	Выполнение условий
Требования к начальной расчетной длине рабочей части образца $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{F_0} \approx 30$ мм (п.1.8)	+	Требования к начальной расчетной длине рабочей части образца $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \approx 30$ мм (п. 6.1)	+	Требования к начальной расчетной длине рабочей части образца $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \approx 30$ мм (п. 6.1)	+
—	—	Требования к минимальной начальной расчетной длине рабочей части образца $L_0 > 20$ мм (п. 6.1)	+	Требования к минимальной начальной расчетной длине рабочей части образца $L_0 > 15$ мм (п. 6.1)	+
—	—	----	+	Требования к размерам базового участка под установку экстензометра $0,9L_0 > L_e > 0,5L_0$ ; $L_e = 25$ мм (п. 8.3)	+
Требования к общей длине рабочей части образца $l = l_0 + (1,5 \dots 2,5) \sqrt{F_0} = 30 + (4,11 \dots 6,84) \approx 34 \dots 41$ (п.1.12)	+	Требования к общей длине рабочей части образца $L = L_0 + (1,5) \cdot \sqrt{S_0} = 30 + (4,11 \dots 6,84) \approx 34 \dots 37$ (Дополнение Д 2.1)	+	Требования к общей длине рабочей части образца $L = L_0 + (1,5) \cdot \sqrt{S_0} = 30 + (4,11 \dots 6,84) \approx 34 \dots 37$ (Приложение D 2.1)	+

длины, присущее соответственно цилиндрическим и плоским образцам. Таким образом, объем наплавленного металла был приведен в соответствие к предварительно установленным на технологических пробах требованиям обеспечения технологической прочности для сварного соединения «основной–наплавленный металл» с участием никелевого жаропрочного сплава ЖС6К. Таблица 3 содержит обобщенный анализ соответствия формы и размеров предложенного на рис. 4 образца базовым требованиям к плоским пропорциональным образцам в НТД [13, 16, 17]. Расчетная оценка суммарного количества погонных тепловложений в изделие для сварной заготовки нового образца по сравнению с цилиндрическими образцами (рис. 5) согласно НТД [13], демонстрирует их снижение ориентировочно в 7...10 раз. По сравнению со стыковым сварным швом ожидаемый эффект снижения суммарных погонных тепловложений при подготовке сварной заготовки нового образца составляет приблизительно 11...15 раз.

Кратковременные механические свойства соединения «основной–наплавленный металл» трудносвариваемого никелевого жаропрочного сплава, имитирующего восстановление кромки лопатки, предлагается оценивать путем испытаний на статическое растяжение двух типов образцов: 50 % основного + 50 % наплавленного металла, имитирующих район линии сплавления; 100 % наплавленного металла. Внешний вид исходных сварных заготовок системы ЖС6У6(ОМ)-ЖС6К(НМ) и ЖС6К(НМ), для которых обеспечивается технологическая прочность соответствующих соединений в процессе многослойной наплавки и последующих термических обработок, со схемой вырезки

образцов для высокотемпературных механических испытаний представлен на рис. 6.

Испытания образцов на статическое растяжение при температуре 1000 °С проводили на сервогидравлической машине МТС-810 (рис. 7) при различных режимах предварительной термической обработки: 1050 °С – 2,5 ч [2]; гомогенизация при температуре 1220 °С (согласно ОСТ1 90126-85) длительностью 2 и 4 ч; гомогенизация при температуре 1220 °С (согласно ОСТ1 90126-85) длительностью 4 ч и последующее старение при температуре 950 °С длительностью 4 ч [18]. В табл. 4 приведены усредненные на основе двух испытаний значения показателей крат-

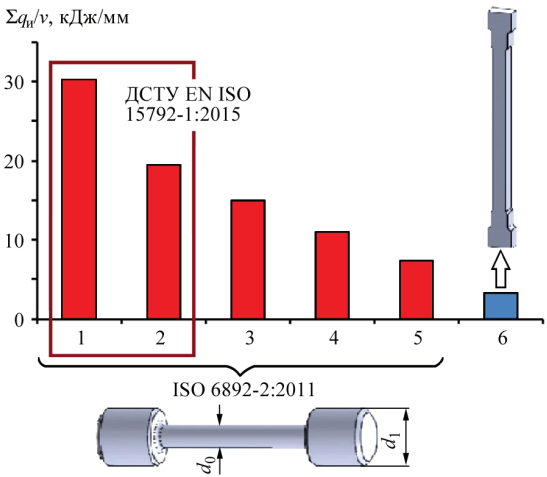


Рис. 5. Расчетная оценка суммарного количества погонных тепловложений в изделие при получении заготовок образцов способом многослойной наплавки сплава ЖС6К на торец пластины для ряда цилиндрических образцов согласно НТД ISO 6892-2:2011 [13] (№ 1–№ 5) и нового плоского пропорционального образца (№ 6) ( $l$  —  $d_0 = 10$  мм,  $d_1 = M16$ ; 2 —  $d_0 = 8$  мм,  $d_1 = M12$ ; 3 —  $d_0 = 6$  мм,  $d_1 = M10$ ; 4 —  $d_0 = 5$  мм,  $d_1 = M8$ ; 5 —  $d_0 = 4$  мм,  $d_1 = M6$ ; 6 — согласно рис. 4

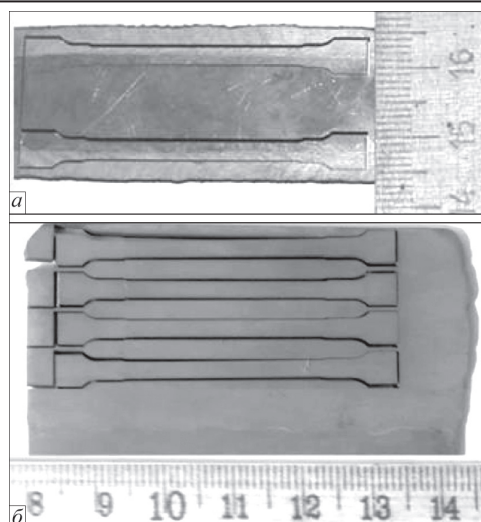


Рис. 6. Внешний вид исходных сварных заготовок со схемой вырезки образцов для высокотемпературных механических испытаний: *a* — 50 % ЖС6У(ОМ)+50 % ЖС6К(НМ); *б* — ЖС6К(НМ)

ковременных механических свойств для трех типов образцов (основной, 50 % основного металла ЖС6У+50 % наплавленного металла ЖС6К; 100 % наплавленный металл ЖС6К), а также табличные данные по основному металлу ЖС6У и ЖС6К [19].

Установлено, что для получения оптимального уровня свойств при 1000 °С наплавленного металла ЖС6К и переходной зоны ОМ ЖС6У – НМ ЖС6К требуется термическая обработка в виде гомогенизации при температуре 1220 °С в течение 4 ч. Последующее старение по режиму 950 °С – 4 ч, часто применяемое на практике для диффузионного отжига перенанесенных защитных покрытий, без значительного изменения прочностных характеристик наплавленного металла ЖС6К ограничивает его пластичность, приближая ее к соответствующим значениям основного металла ЖС6У. При этом в переходной зоне ОМ ЖС6У — НМ ЖС6К наблюдается некоторое снижение значений предела текучести и повышение пластичности.

Показано, что после гомогенизации в течение 4 ч, а также после последующего старения по режиму 950 °С – 4 ч в испытанных при 1000 °С об-



Рис. 7. Внешний вид сервогидравлической машины MTS-810 для высокотемпературных испытаний трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов

разцах достигается достаточно высокий уровень прочностных свойств по сравнению с основным металлом ЖС6У и ЖС6К. На образцах 50 % ОМ ЖС6У + 50 % НМ ЖС6К, имитирующих район линии сплавления при восстановлении бандажной полки лопатки, достигается следующий уровень равнопрочности по сравнению с основным металлом ЖС6У: для значений предела текучести  $\sigma_{0,2}$  — не менее 0,78; предела прочности  $\sigma_b$  — примерно 1,0. На образцах 100 % НМ ЖС6К, имитирующих восстановленную часть бандажной полки лопатки, достигается следующий уровень равнопрочности по сравнению с основным металлом ЖС6У: по значениям предела текучести  $\sigma_{0,2}$  не менее 0,65; предела прочности  $\sigma_b$  с не менее 0,80.

Таким образом установлено, что соединение трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов «основной–наплавленный металл» системы ЖС6У-ЖС6К, выполненное микроплазменной порошковой наплавкой, обеспечивает при 1000 °С уровень жаропрочности не менее 0,65...0,80 относительно основного металла ЖС6У, что соответствует первичным рекомендациям по обеспечению работоспособности мате-

**Таблица 4.** Значения показателей кратковременной прочности образцов на статическое растяжение при 1000 °С

Вид образца	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
100 % НМ ЖС6К	1050 °С – 2,5 ч	322,5	380,5	0,35
	1220 °С – 2 ч	256,3	300,9	5,80
	1220 °С – 4 ч	307,2	415,3	7,20
	1220 °С – 4 ч + 950 °С – 4 ч	315,0	406,0	2,60
50 % ОМ ЖС6У + + 50 % НМ ЖС6К	1220 °С – 2 ч.	403,9	496,2	3,14
	1220 °С – 4 ч.	427,0	516,1	1,60
	1220 °С – 4 ч + 950 °С – 4 ч	372,0	509,0	3,70
ЖС6У ОМ	1220°С – 4 ч	428,4	504,8	5,5
ЖС6К ОМ [19]	1220°С – 4 ч	300...320	500-570	4,5
ЖС6У ОМ [19]	1220°С – 4 ч	460...500	520	1,0...2,0



риала восстановленной бандажной полки рабочей лопатки турбины.

## Выводы

Для получения объективной оценки прочностных свойств соединений «основной–наплавленный металл» трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов с содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы более 50 об. %, необходимо предварительно выбирать геометрические размеры исходной заготовки и образца для механических испытаний с целью обеспечения их технологической прочности как в процессе сварки плавлением, так и в процессе последующей термической обработки.

Анализ методик оценки прочностных свойств наплавленного металла, регламентированных действующей НТД (ГОСТ, ДСТУ, ISO), показал, что приведенное выше условие для соответствующих соединений никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6 не может быть выполнено из-за требований искусственного увеличения жесткости сварного соединения (стыковой шов) увеличенных габаритов захватной части цилиндрических образцов (диаметр не менее 12 мм) или общей длины плоских образцов (не менее 190 мм).

Ввиду нерациональности требований действующей НТД применительно к оценке прочностных свойств таких соединений из трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов возникла необходимость разработки специализированной методики.

На основе базовых рекомендаций действующей НТД предложена рациональная форма плоского пропорционального образца с рабочим сечением 6...10 мм<sup>2</sup>. Габариты захватной части такого образца предельно уменьшены за счет применения промежуточных переходников к захватам испытательной машины MTS-810.

Установлено, что для получения оптимального при 1000 °С уровня свойств для наплавленного металла ЖС6К и его переходной зоны в районе линии сплавления с основным металлом ЖС6У требуется термическая обработка в виде гомогенизации при температуре 1220 °С в течение 4 ч и последующего старения при температуре 950 °С в течение 4 ч.

## Список литературы

1. Пейчев Г.И. (2005) Ремонт изношенных в процессе эксплуатации элементов конструкции бандажных полок литых рабочих лопаток турбины из сплавов типа ЖС. *Авиационно-космическая техника и технология*, 9(25), 221–223.
2. Ющенко К.А., Савченко В.С., Яровицын А.В. и др. (2010) Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки. *Автоматическая сварка*, 8, 25–29.

3. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Там же*, 8, 43–46.
4. Ющенко К.А., Яровицын А.В. (2012) Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Зб. наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, 2012, сс. 506–509.
5. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2016) Закономерности дискретно-аддитивного формирования микрообъемов кристаллизующегося металла при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5–6, 154–161.
6. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. и др. (2016) Особенности управления формой валика при однослойной микроплазменной порошковой наплавке на кромки лопаток авиационных ГТД. *Автоматическая сварка*, 11, 26–34.
7. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2017) Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Там же*, 2, 3–7.
8. ГОСТ 6996-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81) *Сварные соединения. Методы определения механических свойств* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4).
9. (2015) ДСТУ EN ISO 15792-1:2015 *Матеріали зварювальні. Частина 1. Методи випробувань із наплавленого металу зварного шва зі сталі, нікелю і нікелевих сплавів*.
10. (2015) ДСТУ EN ISO 15792-2:2015 *Матеріали зварювальні. Частина 2. Підготовка зразків для випробувань одно- та двосторонніх з'єднань із сталі*.
11. (2015) ДСТУ EN ISO 5178:2015 *Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на повдовжнє розтягування зварного шва в з'єднаннях, виконаних зварюванням плавленням*.
12. (2015) ДСТУ EN ISO 4136-1:2015 *Випробування руйнівні металевих матеріалів. Випробування на розтягування зразка з поперечним швом*.
13. (2011) ISO 6892-2:2011 *Metallic materials. Tensile testing. Part 2: Method of test at elevated temperature*.
14. DuPont John N., Lippold John C., Kisser Samuel D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
15. Яровицын А.В. (2015) Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки. *Автоматическая сварка*, 5–6, 18–25.
16. (1984) ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение* (действует по 01.01.2021).
17. (2006) ДСТУ EN 10002-1:2006 *Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури*.
18. Коваль А.Д., Андриенко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. (2012) Оптимизация режима термической обработки для сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом. *Нові матеріали в металургії та машинобудуванні*, 2, 15–19.
19. Кишкин С.Т. (2006) *Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. Избранные труды*. Москва, Наука.

## References

1. Pejchev, G.I. (2005) Repair of structure components worn out during operation of flange platforms of turbine cast blades from alloys of ZhS type. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, 9(25), 221–223 [in Russian].
2. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Yarovitsyn, A.V. et al. (2010) Development of the technology for repair microplasma power cladding of flange platform faces of aircraft engine high-pressure turbine blades. *The Paton Welding J.*, 8, 21–24.

3. Zhemanyuk, P.D., Petrik, I.A., Chigilejchik, S.L. (2015) Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production. *Ibid.*, **8**, 39-42.
4. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V. (2012) Improvement of technology of repair of upper flange platform of aircraft gas turbine engine blades. In: *Special-purpose program of NASU of Ukraine: Problems of life and safety of constructions and Machines: Collect. of the results of 2010-2012*. Kyiv, PWI, 506-509 [in Russian].
5. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2016) Dependencies of discrete-additive formation of microvolumes of metal being solidified in multilayer microplasma powder surfacing of nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 143-149.
6. Zhemanyuk, P.D., Petrik, I.A., Chigilejchik, S.L. (2016) Peculiarities of bead shape regulation in single-layer microplasma surfacing on edges of aircraft gas turbine engine blades. *Ibid.*, **11**, 23-40.
7. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2017) Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation. *Ibid.*, **2**, 2-6.
8. GOST 6996-66 (ISO 4136-89, ISO 5173-81, ISO 5177-81): *Welded joints. Methods of mechanical properties determination (with modifications 1, 2, 3, 4)* [in Russian].
9. (2015) DSTU EN ISO 15792-1:2015: *Welding consumables. Pt 1. Tests methods for all-weld metal test specimens in steel, nickel and nickel alloys* [in Ukrainian].
10. (2015) DSTU EN ISO 15792-2:2015: *Welding consumables. Pt 2. Preparation of single-run and two-run technique test specimens in steel* [in Ukrainian].
11. (2015) DSTU EN ISO 5178:2015: *Destructive tests on welds in metallic materials. Longitudinal tensile test on weld metal in fusion welded joints* [in Ukrainian].
12. (2015) DSTU EN ISO 4136-1:2015: *Destructive tests on welds in metallic materials. Transverse tensile test* [in Ukrainian].
13. (2011) ISO 6892-2:2011: *Metallic materials. Pt 2. Method of test at elevated temperature*.
14. DuPont, J.N., Lippold, J.C., Kisser, S.D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
15. Yarovitsyn, A.V. (2015) *Energy approach in analysis of microplasma powder surfacing modes*. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 14-21.
16. (1984) GOST 1497-84: *Metals. Tensile testing methods (valid to 01.01.2021)* [in Russian].
17. (2006) DSTU EN 10002-1:2006: *Metallic materials. Tensile tests. Pt 1. Testing method at room temperature* [in Ukrainian].
18. Koval, A.D., Andrienko, A.G., Gajduk, S.V., Kononov, V.V. (2012) Optimization of heat treatment mode for alloy ZhS3LS doped with hafnium and tantalum. *Novi Materialy v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 15-19 [in Russian].
19. Kishkin, S.T. (2006) *Development, investigation and application of high-temperature alloys*. Moscow, Nauka [in Russian].

## ОЦІНКА КОРОТКОЧАСНИХ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З'ЄДНАНЬ ВАЖКОЗВАРЮВАЛЬНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ТИПУ ЖС6

К.А. Ющенко, О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, Г.В. Звягінцева, І.Р. Волосатов, Г.Д. Хрущов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розроблено методику оцінки короточасних механічних властивостей зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» важкозварювальних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС6 при високих температурах, що імітує відновлення крайок робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів при їх серійному ремонті. Обґрунтовано, виходячи з умови забезпечення технологічної міцності такого зварного з'єднання необхідність граничного зменшення в порівнянні з діючою нормативно-технічною документацією розмірів зварних заготовок і зразків для механічних випробувань. Розроблена методика випробування на сервогидравлічній машині MTS-810 при випробуваннях зразків. Вона дозволила обґрунтувати вибір режимів попередньої термічної обробки з метою отримання оптимальних характеристик міцності наплавленого металу ЖС6К. Бібліогр. 19, табл. 4, рис. 7.

*Ключові слова:* мікроплазмове порошкове наплавлення, робочі лопатки ГТД, ремонт бандажних полиць, важкозварювальний нікелевий сплав, зварне з'єднання, технологічна міцність, підготовка зразків, механічні властивості, висока температура

## PECULIARITIES OF EVALUATION OF SHORT-TERM MECHANICAL PROPERTIES OF A JOINT OF DIFFICULT-TO-WELD NICKEL HIGH-TEMPERATURE ALLOYS OF ZHS6 TYPE

K. A. Yushchenko, A. V. Yarovitsyn, N. O. Chervyakov, A. V. Zvyagintseva, I. R. Volosatov, G. D. Khrushchov

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

A procedure was developed for evaluation of short-term mechanical properties of “base – deposited metal” welded joint of difficult-to-weld nickel high-temperature alloys of ZhS6 type at high-temperatures, simulating restoration of edges of blades of aircraft gas-turbine engines at their serial repair. The need of limiting reduction in comparison with acting reference documents of sizes of welded billets and samples for mechanical tests was shown following the condition to provide technological strength of such welded joint. The developed procedure was tested on servohydraulic machine MTS-810 during samples' testing. It allowed making ground for selection of the modes of preliminary heat treatment in order to get optimum strength properties of deposited metal ZhS6K. 19 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* microplasma powder surfacing, GTE blades, repair of shrouds, difficult-to-weld nickel alloy, welded joint, technological strength, sample preparation, short-term mechanical properties, high temperature

Поступила в редакцію 17.04.2019