



Свариваемость жаропрочных сплавов,  
применяемых в авиационных газотурбинных  
двигателях

Л.И. Сорокин  
*кандидат технических наук*

Ноябрь 1996

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Сварочное производство», № 4, 1997 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

# **Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях**

Л.И. Сорокин

*Всероссийский институт авиационных материалов*

Увеличение параметров и ресурса работы современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной степени достигнуто за счет использования жаропрочных сплавов в сварных узлах, условия работы которых характеризуются длительным воздействием нагрузок, высоких температур (до 900–1100°С) и агрессивных сред. При этом к сплавам такого типа предъявляют требования образовывать качественные сварные соединения, что является сложной задачей, поскольку с повышением жаропрочности сплавов снижаются такие показатели свариваемости, как сопротивляемость образованию трещин при сварке и последующей термообработке.

Целью данной работы является сравнительный анализ свариваемости наиболее широко применяемых в промышленности жаростойких, жаропрочных, дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых сплавов. Химический состав и режимы старения и закалки этих сплавов приведены в табл. 1 и 2.

К жаростойким гомогенным сплавам относят никелевые сплавы ЭИ435, ЭИ602, ЭИ868, имеющие аустенитную структуру  $\gamma$ -твердого раствора, который может быть упрочнен молибденом, ниобием и вольфрамом. Увеличение содержания этих элементов способствует повышению кратковременной, длительной прочности и стойкости против образования горячих трещин. Высокая окалиностойкость достигается за счет легирования 20% хрома.

Таблица 1.

Сплав	Содержание элементов, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	B	Прочие
ХН78Т (ЭИ435)	≤0,12	≤0,8	≤0,7	19–22	Основа	–	–	–	≤0,15	0,15–0,35	≤1,0	–	≤0,2Cu
ХН75МБТ (ЭИ602)	≤0,1	≤0,8	≤0,4	19–22	–«–		1,8–2,3	0,9–1,3	0,35–0,75	0,35–0,75	–	–	–
ХН60В (ЭИ868)	≤0,1	≤0,8	≤0,5	23,5–26,5	–«–	13–16	–	–	≤0,5	0,3–0,7	≤4	–	–
ХН30ВМТ (ЭП437)	≤0,1	≤0,6	≤0,6	14–16	27–30	4,5–6	3–4	–	≤0,5	1,8–2,3	Основа	–	≤0,02Zr
ХН45МВТЮБР (ЭП718)	≤0,1	≤0,3	≤0,6	14–16	43–47	2,5–3,5	4–5,2	0,8–1,5	0,9–1,4	1,9–2,4	–«–	≤0,008	≤0,02Zr, ≤0,1Ce
ХН50ВМТЮБ (ЭП648, ВХ4Л)	≤0,1	≤0,4	≤0,5	32–35	Основа	4,3–5,3	2,3–3,5	0,5–1,1	0,5–1,1	0,5–1,1	≤4,0	≤0,008	–
ХН65ВМБЮ (ЭП914)	≤0,06	≤0,5	≤0,5	17–18,5	–«–	5,5–7,5	3–5	4–4,7	1,5–1,9	–	≤1,5	≤0,006	0,1–0,2Nb
ХН68ВМТЮК (ЭП693)	≤0,1	≤0,5	≤0,4	17–20	–«–	5–7	3–5	–	1,6–2,3	1,1–1,6	≤5,0	≤0,005	5–8Co, ≤0,05Ce
ХН62ВМІЮТ (ЭП708)	≤0,1	≤0,6	≤0,3	17,5–20	–«–	5,5–7,5	4–6	–	1,9–2,3	1,0–1,4	≤4,0	≤0,008	≤0,03Ce
ХН56ВМТЮ (ЭП199)	≤0,1	≤0,6	≤0,5	19–22	–«–	9–11	4–5	–	2,1–2,6	1,1–1,6	≤4,0	≤0,008	≤0,05Mg
ХН50МВКТІЮР (ЭП99)	≤0,1	≤0,3	≤0,3	17,5–19,5	–«–	5,5–7,0	3,5–5	≤1,5	2,5–3	1–1,5	≤3,0	≤0,005	5–8Co, ≤0,02Ce
ВЖЛ14	≤0,08	≤0,4	≤0,4	18–20	–«–	–	4–5	–	1,2–1,5	2,5–3,1	8–10	≤0,005	–

Таблица 2.

Сплав	Закалка от температуры, °С, на воздухе	Старение при температуре, °С, в течение, ч, на воздухе	$\gamma'$ -фаза, %
ХН78Т (ЭИ435)	1020	–	–
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	1050	–	–
ХН60В (ЭИ868)	1170	–	–
ХН30ВМТ (ЭП437)	1120	750, 16	3–4
ХН45МВТЮБР (ЭП718)	1050	780, 5	
		650, 16	10–11
ХН50ВМТЮБ (ЭП648, ВХ4Л)	1150	900, 16	<5
ХН65ВМБЮ (ЭП914)	1100	800, 16	10–12
ХН68ВМТЮК (ЭП693)	1100	900, 5	13–15
ХН62ВМЮТ (ЭП708)	1100	800, 15	13–16
ХН56ВМТЮ (ЭП199)	1150	950, 5	16
ХН50МВКТЮР (ЭП99)	1100	900, 8	18–20
ВЖЛ14	1120	700, 16	16

Отличительной особенностью жаропрочных дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых (ЭП437, ЭП718) и никелевых (ЭП648, ЭП914, ЭП693, ЭП708, ЭП199, ЭП99, ВХ4Л, ВЖЛ14) сплавов является наличие в их составе достаточного количества алюминия и титана, которые, взаимодействуя с никелем, образуют  $\gamma'$ -фазу типа  $Ni_3(Al, Ti)$ . Микроструктура этих сплавов представляет собой твердый раствор с ГЦК-решеткой, содержащий карбиды и когерентную с твердым раствором интерметаллидную  $\gamma'$ -фазу, прочность которой возрастает с ростом температуры, а ее наследственная пластичность препятствует охрупчиванию сплавов. Жаростойкость сплавов зависит от содержания, состава и размера  $\gamma'$ -фазы и определяется в значительной мере содержанием алюминия и титана. Тугоплавкие элементы (ниобий, тантал, молибден и вольфрам), упрочняя твердый раствор, могут также входить в состав  $\gamma'$ -фазы, увеличивая ее содержание. Наибольшая жаропрочность этих сплавов достигается после закалки и последующего старения, в результате чего образуются мелкодисперсные выделения  $\gamma'$ -фазы, которые создают торможение пластической деформации в сплаве (см. табл. 2).

Стойкость против образования горячих трещин листовых полуфабрикатов определяли на пластинчатой пробе (темп нарастания растягивающих деформаций, при сварке которой зависит от жесткости образца, характеристик жаропрочности и релаксационной стойкости испытуемых материалов [1]) и по методике ЛТП 1-6 (темп нарастания растягивающих деформаций задается скоростью деформации образца в процессе сварки [2]). Литейные сплавы исследовали на клиновой пробе, которая позволяет изменять величину зерна и объем наплавленного металла [3] на одном образце.

Стойкость против образования термических трещин оценивали по результатам провоцирующего нагрева образцов дисковой пробы толщиной 3 мм с диаметром образца 120 мм и диаметром контрольного шва 25 мм и круговой пробы (рис. 1).

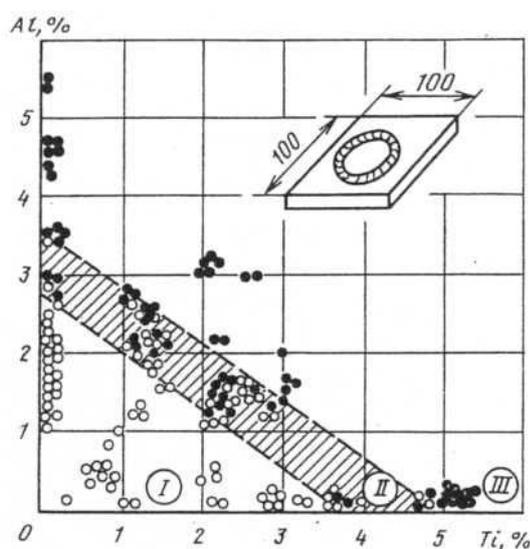


Рисунок 1. Стойкость против образования термических трещин на круговой пробе опытных и промышленных сплавов в зависимости от содержания алюминия и титана (светлые кружки – образцы без трещин, темные – с трещинами): I–III – соответственно, сплавы, не склонные к образованию трещин, с умеренной и высокой склонностью

В табл. 3 представлены результаты испытаний на склонность к образованию горячих трещин не менее 2–4 промышленных плавов каждого сплава. Анализ результатов испытаний образцов пластинчатой пробы показал, что при сварке гомогенных сплавов ЭИ435, ЭИ602, ЭИ868

стойкость против образования горячих трещин выше, чем при сварке никелевых дисперсионно-твердеющих сплавов в закаленном состоянии, что совпадает с опытом их применения в промышленности, а деформационная способность находится практически на одном уровне ( $v_{кр}=0,04\div 0,06$  мм/с). По-видимому, это связано с более низким темпом нарастания растягивающих деформаций при сварке гомогенных сплавов, т.к. по сравнению с дисперсионно-твердеющими сплавами они характеризуются меньшей жаропрочностью, большей релаксационной способностью из-за более низкого содержания тугоплавких элементов (см. табл. 1) и отсутствием  $\gamma'$ -фазы, содержание которой у дисперсионно-твердеющих сплавов при закалке на воздухе может составлять до 5% [4].

Сплав ЭИ868 по сравнению с другими гомогенными имеет в своем составе большее количество тугоплавких элементов (13–16%) и обладает лучшей жаропрочностью и релаксационной стойкостью, что является причиной повышения его деформационной способности ( $v_{кр}=0,06$  мм/с) и некоторого снижения стойкости против образования трещин ( $K_{тр}=4\div 6\%$ ).

Содержание  $\gamma'$ -фазы определяет также разницу технологической прочности при сварке сплавов в закаленном и состаренном состоянии. При сварке сплавов ЭП437 и ЭП648, у которых при старении выделяется  $\leq 5\%$   $\gamma'$ -фазы, стойкость против образования горячих трещин в закаленном и состаренном состоянии находится на одном уровне. При сварке сплавов ЭП718 и ЭП914 с 10–12%  $\gamma'$ -фазы стойкость против образования трещин в состаренном состоянии увеличивается в 1,5–2 раза, для сплава ЭП693 с 13–15%  $\gamma'$ -фазы – в 2–3 раза, а для сплава ЭП99 с 18–20%  $\gamma'$ -фазы – в 6 раз (см. табл. 2, 3).

Таблица 9.

Сплав, метод выплавки	Присадочный материал	$K_{тр}$ , %	$\nu_{кр}$ , мм/с
ХН78Т (ЭИ435), ВИ	ЭИ435	3-4/-	0,050/-
ХН75МБТЮ (ЭИ602), ВИ	ЭИ602	3-4/-	0,050/-
	ЭП367	2-3/-	-
	ЭК-22	1-2/-	-
ХН60К (ЭИ868), ВИ	ЭИ868	4-6/-	0,060/-
	ЭП367	3-5/-	0,064/-
	ЭК-22	2-3/-	-
ХН30ВМТ (ЭП437), ВИ	ЭП437	9-10/9-11	0,033/-
	ЭП533	8-9/8-9	0,04/-
	ЭП367	4-6/4-6	0,045/-
ХН45МВТЮБР (ЭП718), ВД	ЭП718	-	0,033/0,030
	ЭП533	8-10/14-18	0,051/0,045
	ЭП367	5-6/10-14	0,060/0,052
	ЭК-22	3-5/8-10	0,061/-
ХН50ВМТЮБ (ЭП648), ВИ	ЭП648	5-8/7-9	0,050/-
	ЭП367	-	0,061/-
	ЭК-22	3-4/4-5	0,064/-
ХН65ВМБЮ (ЭП914), ВД	ЭП914	7-10/14-18	0,040/0,035
	ЭП533	5-7/-	0,045/0,040
	ЭП367	4-5/-	0,050/-
	ЭК-22	3-4/8-10	0,058/0,050
ХН68ВМТЮК (ЭП693), ВД	ЭП693	-	0,050/-
	ЭП533	10-12/23-26	0,051/-
	ЭП367	6-8/21-23	0,060/0,053
	ЭП595	3-4/-	-
	ЭК-22	3-4/9-11	0,060/-
ХН62ВМЮТ (ЭП708), ВД	ЭП708	-	0,053/-
	ЭП533	7-8/-	0,059/-
	ЭП595	2-4/-	-
	ЭП367	4-6/-	0,064/-
	ЭК-22	4-6/-	0,070/-
ХН56ВМБЮ (ЭП199), ВД	ЭП199	5-7/-	0,050/-
	ЭП533	4-6/-	-
ХН50МВКТЮР (ЭП99), ВД	ЭП99	-	0,046/-
	ЭП533	7-13/26-76	0,050/-
	ЭП595	3-5/20-33	0,060/-
	ЭП367	4-6/25-50	0,060/-
	ЭК-22	1-2/-	0,060/-
		<i>Клиновья проба <math>\delta</math>, мм</i>	
ВХ4Л, ВИ	ЭП648	18-23/18	0,040/-
ВЖЛ14, ВИ	ЭП533	18-20/14	0,041/0,040

Примечание. В числителе даны значения при закалке, в знаменателе – при старении.

Литейные сплавы, имеющие по сравнению с деформированными большую структурную и химическую неоднородность вследствие дендритной ликвации [5], обладают большей склонностью к образованию горячих трещин. Это подтверждают результаты испытания клиновой пробы, при сварке которой образуются трещины при толщине 18–23 мм, в то время как при сварке деформированных сплавов на такой толщине трещины отсутствуют. При аргоно-дуговой сварке деформированного сплава ЭП648 стойкость против образования трещины находится на более высоком уровне ( $v_{кр}=0,051$  мм/с) по сравнению с литейным сплавом аналогичного состава ВХ4Л ( $v_{кр}=0,03$  мм/с). При этом склонность к образованию трещин литейных сплавов в ОШЗ увеличивается при сварке деталей толщиной  $<3$  мм. Опыт применения сплава ВХ4Л в литосварных конструкциях показал, что получить герметичные соединения при сварке деталей толщиной 2 мм возможно только в случае отливки деталей на чистых шихтовых материалах. Повысить технологическую прочность за счет применения чистых шихтовых материалов возможно также и на деформированных сплавах (табл. 4). Как видно из этой таблицы, стойкость против образования трещин можно увеличить также за счет перехода от открытой выплавки в индукционных печах (ОИ) к вакуумно-индукционной (ВИ) или вакуумно-дуговой (ВД), что связано со снижением содержания кислорода и неметаллических включений в сплаве [6].

Таблица 4.

Сплав	Метод выплавки	$v_{кр}$ , мм/с
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	ОИ	0,033
	ВИ	0,050
ХН62ВМЮТ (ЭП708)	ОИ	0,033
	ВИ	0,053
ХН45МВТЮБР (ЭП718)	ВД, чистые шихтовые материалы	0,041
	ВД + 40% отходов	0,033
ХН68ВМТЮК (ЭП693)	ВД, чистые шихтовые материалы	0,066
	ВД + 70% отходов	0,050
ХН56ВМТЮ (ЭП199)	ВД, чистые шихтовые материалы	0,060
	ВД + 70% отходов	0,050

Эффективным средством повышения технологической прочности при аргоно-дуговой сварке является применение в качестве присадки сварочных проволок ЭП533, ЭП595, ЭП367, ЭК-22, обладающих по сравнению со свариваемыми сплавами более высокой стойкостью против образования горячих трещин [7]. Особенно это заметно при сварке железохромоникелевых сплавов ЭП437 и ЭП718, невысокая деформационная способность которых ( $v_{кр}=0,03$  мм/с) повышается (до  $v_{кр}=0,04\div 0,06$  мм/с) при применении этих присадочных материалов.

Сравнительный анализ промышленных сплавов позволил оценить не только их технологическую прочность, но и применяемые методики их испытания. Методика ЛТП 1-6, рекомендуемая ГОСТ 26389–84, позволяет достаточно стабильно оценивать деформационную способность металла шва в температурном интервале хрупкости, но не учитывает изменения темпа нарастания растягивающих деформаций в шве, показатели которого зависят от жаропрочности и релаксационной стойкости сплавов [1, 8]. Указанные недостатки отсутствуют при применении пластинчатой пробы, которая достаточно полно имитирует условия сварки жестких конструкций. Это позволяет учитывать изменения как деформационной способности, так и темпы нарастания растягивающих деформаций в металле шва за счет изменения состава, жаропрочности и релаксационной стойкости испытываемых материалов.

Таким образом, при испытании на склонность к образованию горячих трещин сплавов, имеющих разную жаропрочность и релаксационную стойкость, целесообразно применять пластинчатую пробу, а методику ЛТП 1–6 использовать параллельно для оценки их деформационной способности. При выборе присадочных материалов, методов выплавки сплавов и при изучении других технологических и металлургических факторов, не оказывающих существенного влияния на жаропрочность и релаксационную стойкость сплавов, можно использовать методики типа

ЛТП 1-6, которые позволяют получать стабильные показатели технологической прочности на меньшем количестве металла.

На основе многолетней практики применения этих методик жаростойкие и жаропрочные сплавы характеризуют по методике ЛТП 1-6 как сплавы с высокой деформационной способностью ( $v_{кр} \geq 0,07$  мм/с), удовлетворительной ( $v_{кр} = 0,03 \div 0,07$  мм/с) и низкой ( $v_{кр} \leq 0,03$  мм/с), при испытании пластинчатой пробы – как сплавы с высокой стойкостью против образования горячих трещин ( $K_{тр} \leq 5\%$ ), удовлетворительной ( $K_{тр} = 6 \div 12\%$ ) и низкой ( $K_{тр} \geq 13\%$ ).

Сварные конструкции из дисперсионно-твердеющих сплавов склонны к растрескиванию при термообработке. Большинство исследователей связывают этот вид разрушения с суммарным действием остаточных сварочных напряжений, объемных напряжений, вызванных выделением из твердого раствора  $\gamma'$ -фазы, и термических напряжений. В работе [9] предложена классификация жаропрочных сплавов по их стойкости против образования трещин при термообработке, при которой учитывается содержание алюминия, титана и  $\gamma'$ -фазы в сплавах. Однако, как показали дальнейшие исследования этих сплавов в лабораторных условиях (см. рис. 1) и опыт их применения в промышленности, эта классификация требует уточнения составов сплавов, образующих группу не склонных и с умеренной склонностью к образованию термических трещин. Согласно предложенной ранее классификации к первой группе относили гомогенные и слабостареющие сплавы с содержанием до 1,5% алюминия и до 2,3% титана, что соответствовало не более 5%  $\gamma'$ -фазы [9]. Результаты экспериментов с опытными и промышленными сплавами различного состава на круговой пробе толщиной 5–15 мм с контрольными швами диаметром 30, 50, 70 мм, выполненными электронно-лучевой и аргоно-дуговой сваркой, показали, что независимо от размеров образцов, технологии сварки и режимов термообработки трещины отсутствуют у сплавов, имеющих в своем составе до 2,7% алюминия и до 3,7% титана (см. рис. 1). Этой области соответствуют сплавы ЭП648, ВХ4Л, ЭП437, ЭП914, ЭП718, в которых после старения

содержится  $\leq 10\text{--}12\%$   $\gamma'$ -фазы (см. табл. 2) и не склонные к образованию термических трещин (рис. 2).

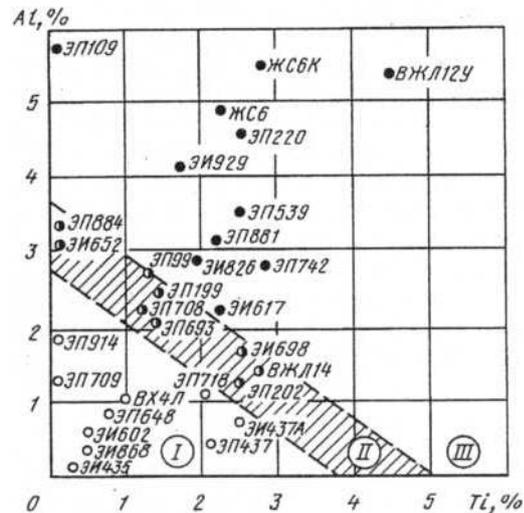


Рисунок 2. Стойкость против образования трещин при термообработке сварных соединений жаропрочных сплавов в зависимости от содержания алюминия и титана (● – сплавы с умеренной склонностью к образованию трещин, остальные обозначения – см. рис. 1)

При содержании в сплавах 2,7–3,5% алюминия и 3,7–5% титана возможность образования трещин на круговой пробе увеличивается с ростом толщины образца, уменьшением диаметра контрольного шва и замены электронно-лучевой сварки на аргоно-дуговую, что связано с повышением в образце остаточных сварочных напряжений (см. рис. 1). Как видно на рис. 2, к этой группе относятся сплавы ВЖЛ14, ЭП693, ЭП708, ЭП199, ЭП99 с умеренной склонностью к образованию термических трещин, содержащие после старения 13–20%  $\gamma'$ -фазы (см. табл. 2). Положение деформированных сплавов на рис. 2 подтверждается результатами испытания дисковой пробы, согласно которым их склонность к образованию термических трещин возрастает в следующей последовательности: ЭП693, ЭП708, ЭП199, ЭП99 (табл. 5). На практике растрескивание этих сплавов при термообработке имеет место на сварных узлах с высоким уровнем остаточных напряжений. Уменьшить растрескивание можно путем оптимизации технологии сварки, применения присадочных материалов из гомогенных сплавов ЭП367 и ЭК-22 (см. табл. 5) и термообработки по следующей схеме: закалка, сварка, закалка, старение. Для сплавов с

повышенным содержанием алюминия и титана, находящихся вблизи верхней границы этой группы, рекомендуется для сплава ЭП199 применять перед сваркой перестаривание при 950°С в течение 5 ч с охлаждением на воздухе, а для сплава ЭП99 при закалке для снятия сварочных напряжений средняя скорость нагрева в интервале 700–900°С должна составлять  $\geq 25\text{--}40^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Таблица 5.

Сплав	Присадочный материал	Время до образования трещин в дисковой пробе при нагреве до 800°С, мин
ХН68МТЮК (ЭП693)	ЭП533	70
	ЭП367	Без трещин до 16 ч
ХН62ВМЮТ (ЭП708)	ЭП533	40
	ЭП367	Без трещин до 16 ч
ХН56ВМТЮ (ЭП 199)	ЭП533	30
	ЭП367	Без трещин до 16 ч
ХН50МВКТЮР (ЭП99)	ЭП533	20
	ЭП367	30

Примечание. Для всех сплавов вакуумно-дуговая выплавка.

В третью группу входят сплавы с содержанием  $2 > 5\%$   $\gamma'$ -фазы, их применение в сварных конструкциях нецелесообразно из-за высокой склонности к образованию термических трещин.

В табл. 6 приведены механические свойства сварных соединений, выполненных электронно-лучевой (ЭЛС), аргоно-дуговой (АрДЭС) и дуговой сваркой (ДЭС).

При АрДЭС и ДЭС в качестве присадочного материала применяли промышленные марки сварочных проволок [7] и покрытых электродов [10]. Сварку всех сплавов проводили в закаленном состоянии. Для гомогенных сплавов термообработку после сварки не проводили, для дисперсионно-твердеющих сплавов проводили закалку и старение. Как видно из табл. 6, кратковременная и длительная прочность сварных соединений жаростойких гомогенных сплавов ЭИ435, ЭИ602, ЭИ868 независимо от методов сварки и применяемых присадочных материалов находятся на уровне основного материала.

Таблица 6.

Сплав, метод выплавки	Способ сварки	Присадочный материал	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа, при $T$ , °С				$\sigma_{100}$ , МПа, при $T$ , °С	
				20	600	800	900	800	900
ХН78Т (ЭИ435), ВИ	Основной металл			720–770	600–610	180–220	–	45	15
	АрДЭС	ЭИ435	1,5	770–790	570–590	270–290	–	44	–
	–«–	–«–	12	700–710	580–590	250–260	–	44	–
	ДЭС	ИМЕТ-10	12	790	–	280–290	–	–	–
	–«–	ЦТ-28	12	790	–	280–290	–	–	–
	–	ВИ-ИМ-1	12	780–810	–	280–300	–	–	–
ХН75МБТЮ (ЭИ602), ВИ	Основной металл			820–850	660	290	–	60–70	29
	АрДЭС	ЭИ602	2	840–860	670–680	310–320	–	–	–
	–«–	ЭП367	2	810–820	640–660	290–310	–	–	–
	–«–	ЭК-222	2	830–850	680–700	300–320	–	–	–
	ДЭС	ОЗЛ-25Б	2	740–750	600–630	290–320	–	70	–
ХН60В (ЭИ868), ВИ	Основной металл			740–900	600–650	380–420	–	110	52
	ЭЛС	–	12	780–790	–	410–420	–	110	–
	–«–	–	30	700–800	–	380–400	–	100	–
	АрДЭС	ЭИ868	2	840–880	650–690	430–440	–	110	–
	–«–	–«–	12	820–840	700–710	390–420	–	–	–
	–«–	ЭП367	2	850–870	700–720	350–390	–	–	–
	–«–	ЭК-22	2	850–870	680–720	420–450	–	–	–
	ДЭС	ЦТ-28	12	820	–	330–360	–	–	–
	–«–	ВИ-ИМ-1	12	780–870	–	340–350	–	–	–
ХН30ВМТ (ЭП437), ВИ	Основной металл			970–1040	850–900	480–540	–	180	–
	ЭЛС	–	12	1080–1120	810–820	510–530	–	180	–
	–«–	–	30	1000–1090	–	400–450	–	160	–
	АрДЭС	ЭП437	2	1050–1080	770–790	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.

Сплав, метод выплавки	Способ сварки	Присадочный материал	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа, при $T$ , °С				$\sigma_{100}$ , МПа, при $T$ , °С	
				20	600	800	900	800	900
	-«-	-«-	12	1040–1050	810–820	500–520	–	–	–
ХН45МВТЮБР (ЭП718), ВД	Основной металл			1100–1250	1150–1250	580–670	–	210	–
	ЭЛС	–	2	1300–1310	1110–1170*	680–810	–	650*	–
	-«-	–	10	1290–1310	1100–1140*	700–730	–	650*	–
	АрдЭС	ЭП533	2	1210–1300	1010–1070*	690–780	–	650*	–
	-«-	-«-	10	1070–1080	960–990*	–	–	550*	–
	-«-	ЭП367	2	1150–1190	940–970*	710–760	–	500*	–
	-«-	-«-	10	830–840	660–680*	–	–	500*	–
	ДЭС	ВИ-ИМ-1	3	940–1080	–	620–640	–	160	–
-«-	-«-	18	800–820	–	480–490	–	90	–	
ХН50ВМТЮБ (ЭП648), ВИ	Основной металл			900–950	–	600–640	300–350	180	70
	ЭЛС	–	12	900–930	–	540–590	–	180	–
	АрдЭС	ЭП648	1,5	900–950	–	630–650	300–350	180	70
	-«-	-«-	12	900–930	–	540–590	–	140	–
	-«-	ЭК-22	12	760–780	–	440–450	–	–	–
	ДЭС	ОЗЛ-25Б	3	620–680	–	430–440	–	110	–
	-«-	-«-	12	740–770	–	460–470	–	100	–
ХН65ВМБЮ (ЭП914), ВД	Основной металл			1050–1200	950–1050	700–800	380–430	230–250	–
	ЭЛС	–	2	1180–1200	1040–1050*	790–800	–	–	–
	-«-	–	12	1120–1130	1120–1180*	760–770	–	240	–
	АрдЭС	ЭП914	2	1150–1230	980–1000*	650–720	–	240	–
	-«-	ЭП914	12	1120–1180	1000–1040*	710–800	–	–	–
	-«-	ЭП533	2	1010–1190	–	720–730	–	–	–
	-«-	ЭП367	2	1010–1080	–	710–730	–	–	–

Продолжение таблицы 6.

Сплав, метод выплавки	Способ сварки	Присадочный материал	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа, при $T$ , °С				$\sigma_{100}$ , МПа, при $T$ , °С	
				20	600	800	900	800	900
	-«-	ЭК-22	2	1060–1080	870–900*	710–720	–	240	–
	-«-	ЭК-22	12	850–950	680–690*	630–650	–	–	–
	ДЭС	ОЗЛ-25Б	2	890–940	710–740*	510–520	–	–	–
ХН68ВМТЮК (ЭП693), ВД	Основной металл			1020–1080	–	690–740	340–380	240–260	90
	ЭЛС	–	2	1180–1210	1010–1080*	770–780	–	240	90
	-«-	–	12	1110–1170	–	770–780	–	250	–
	АрДЭС	ЭП533	2	1010–1190	880–960*	720–810	410–420	230	90
	-«-	ЭП367	2	1030–1060	790–810*	640–680	–	230	–
	-«-	ЭК-22	2	1060–1080	–	650–810	420–450	230	–
	ДЭС	ВИ-ИМ-1	1,5	1030–1090	–	600–620	–	160	–
	-«-	-«-	12	910–930	–	500–520	–	100	–
ХН62ВМТЮ (ЭП708), ВД	Основной металл			1100–1200	–	700–770	400–480	230–260	65–85
	ЭЛС	–	2	1020–1030	–	740–760	430–500	–	90
	-«-	–	12	1110–1130	–	680–710	–	250	–
	АрДЭС	ЭП533	22	1010–1020	–	710–740	430–480	–	90
	ДЭС	ВИ-ИМ-1	2	950–960	–	520–650	–	150	–
ХН56ВМТЮ (ЭП199), ВД	Основной металл			1100–1150	–	650–750	380–430	260–270	110
	ЭЛС	–	12	1160–1170	–	850–870	–	260	–
	-«-	–	30	1140–1190	–	800–850	–	250	–
	АрДЭС	ЭП533	2	990–1000	–	730–750	–	–	–
	-«-	-«-	12	940–1000	–	710–790	–	–	–
	ДЭС	ИМЕТ-10	12	1010–1060	–	430–450	–	–	–
	-«-	ВИ-ИМ-1	12	930–940	–	390–400	–	150	–

Продолжение таблицы 6.

Сплав, метод выплавки	Способ сварки	Присадочный материал	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа, при $T$ , °С				$\sigma_{100}$ , МПа, при $T$ , °С	
				20	600	800	900	800	900
ХН50МВКТЮР (ЭП99), ВД	Основной металл			1120–1180	920–970	750–800	480–530	310	120
	ЭЛС	–	2	1080–1160	–	710–750	–	–	130
	-«-	–	12	1060–1140	–	700–760	–	–	–
	АрдЭС	ЭП533	1,5	1090–1120	–	750–770	480–520	260	130
	-«-	ЭП367	1,5	1060–1130	–	720–760	–	240	–
	-«-	ЭК-22	1,5	1100–1200	–	740–790	–	250	–
ВХ4Л, ВИ	Основной металл			800–900	–	550–650	–	180	–
	АрдЭС	ЭП648	12	800–850	700–750	550–600	–	180	–
	-«-	ЭП533	12	850	–	600	–	180	–
	-«-	ЭП367	12	800	–	600	–	100	–
ВЖЛ14	Основной металл			800–850	680–780	630–680	450–480	–	110
	ЭЛС	–	12	780–810	–	650–660	–	–	–
	АрдЭС	ЭП533	12	790–830	–	560–590	–	220	90
	-«-	ЭП367	12	720–750	–	490–500	–	100	–
	ДЭС	ИМЕТ-10	12	720–750	–	480–500	–	–	–
	-«-	ВИ-ИМ-1		700–720	–	490–530	–	100	–

\* При 650°С.

Аналогичная зависимость имеет место при ЭЛС дисперсионно-твердеющих сплавов. При АрДЭС и ДЭС этих сплавов механические свойства сварных соединений зависят от состава присадочных материалов и толщины свариваемых сплавов. Прочность сварных соединений тонколистовых материалов толщиной  $< 2$  мм, выполненных АрДЭС с присадочным материалом из сплавов ЭП648, ЭП437, ЭП914 и сварочной проволокой ЭП533 (2,3–2,9% Ti,  $\leq 0,4\%$  Al), составляет 0,95–0,98 от прочности основного материала. Применение в качестве присадочного материала проволок из гомогенных сплавов ЭП367, ЭК-22, а при ДЭС – электродов ИМЕТ-10, ВИ-ИМ-1, ОЗЛ-25Б позволяет получать сварные соединения с достаточно высокой прочностью, которая при АрДЭС составляет 0,85–0,9, а при ДЭС – 0,8–0,85 от прочности основного материала. Это достигается за счет дополнительного легирования шва титаном и алюминием из основного металла.

С увеличением толщины свариваемого металла при многопроходной сварке в разделку растет ЗТВ и объем наплавленного металла, что вызывает снижение прочности сварных соединений. При толщине металла 10–12 мм прочность сварных соединений, выполненных АрДЭС с присадками из основного металла и ЭП533, снижается до 0,8–0,9, а для присадок из гомогенных сплавов и при ДЭС покрытыми электродами – до 0,7–0,75 от прочности основного металла. При толщине свариваемого материала  $> 15$  мм прочность сварных соединений при АрДЭС и ДЭС приближается к прочности наплавленного этими присадками металла [1].

Применение закалки после сварки дисперсионно-твердеющих сплавов существенно не влияет на кратковременную прочность, вызывая некоторое повышение пластичности, ударной вязкости ( $\leq 10\%$ ) и незначительное снижение длительной прочности ( $\leq 5–7\%$ ).

При сварке дисперсионно-твердеющих сплавов в состаренном состоянии жаропрочность их соединений ниже, чем сплавов, прошедших старение после сварки, и приближается к показателям сплавов в закаленном состоянии [1].

Установлено, что режимы ЭЛС и АрДЭС не оказывают существенного влияния на механические свойства сварных соединений.

## **Выводы**

Жаростойкие гомогенные сплавы обладают высокой стойкостью против образования горячих трещин и не склонны к растрескиванию при термообработке.

Дисперсионно-твердеющие сплавы имеют удовлетворительную стойкость против образования горячих трещин.

Сплавы ЭП648, ВХ4Л, ЭП437, ЭП718, ЭП914 не склонны к образованию трещин при термообработке, а для сплавов ВЖЛ14, ЭП693, ЭП708, ЭП199, ЭП99 для предотвращения образования термических трещин необходимо применять присадочные материалы из гомогенных сплавов, перед сваркой проводить перестаривание, после сварки – закалку.

## **Список литературы:**

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов в состаренном состоянии // Автоматическая сварка. 1983. №7. С. 12–16.
2. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Оптимизация сварочной ремонтной технологии газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов // Сварочное производство. 1997. №1. С. 19–23.
3. Сорокин Л.И., Елкин И.С. Клиновья стыковая проба для оценки свариваемости литых сталей и сплавов // Автоматическая сварка. 1975. №8. С. 6–8.
4. Структура и свойства сплава марки ХН60МВТЮ (ЭП487) / Л.Н. Зими́на, Г.Ф. Кошелева, Б.А. Карданов и др. // Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. – М.: Наука, 1967. С. 181–186.
5. Егоршин М.В., Эстулин Г.В. Влияние горячей деформации, гомогенизации и старения на дендритную неоднородность в никелевых сплавах // Сталь. 1964. №9. С. 845–848.
6. Свойства сплава ЭП590 различными методами выплавки / В.К. Цвенков, Л.Н. Зими́на, В.В. Томили́н и др. // Сталь. 1974. №4. С. 641–643.
7. Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С., Тупикин В.И. Сравнительная оценка присадочных проволок для аргонодуговой сварки жаропрочных сплавов // Сварочное производство. 1993. №10. С. 31–33.

8. Анализ термдеформационных процессов в зоне термического влияния при сварке жаропрочного никелевого сплава / В.Е. Эйдельштейн, Б.Ф. Якушин, В.И. Махненко и др. // Автоматическая сварка. 1980. №1. С. 11–15.
9. Сорокин Л.И., Тупикин А.И. Классификация жаропрочных никелевых сплавов по их стойкости против образования трещин при термической обработке сварных соединений // Автоматическая сварка. 1985. №5. С. 23–25.
10. Сидлин З.А., Сорокин Л.И. Сравнительная оценка промышленных электродов на никелевой основе // Сварочное производство. 1983. №2. С. 25–28.