



СВАРИВАЕМОСТЬ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ (Обзор)

А. Б. МАЛЫЙ, Ю. В. БУТЕНКО, инженеры (ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», г. Николаев),
В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы причины образования горячих трещин в металле шва при сварке плавлением высоколегированных термоупрочняемых сплавов на основе никеля. Показано, что имеющиеся в литературе рекомендации по устранению трещин применимы только при небольшом содержании γ -фазы. Намечены пути решения этой проблемы для сплавов с высоким содержанием алюминия и титана.

Ключевые слова: дуговая сварка, термоупрочняемые никелевые сплавы, γ -фаза, горячие трещины, химический состав, релаксационная стойкость, термообработка, присадочная проволока, прочность

Совершенствование газотурбинных установок (ГТУ) предусматривает повышение температуры рабочей среды, увеличение их мощности и ресурса. При этом надежность промышленных ГТУ определяется не только их конструктивными особенностями — не менее важное значение имеют свойства используемых материалов. В этой связи гомогенные нетермоупрочняемые сплавы на основе никеля типа ЭИ 435 заменили гетерогенными термоупрочняемыми, отличающимися более высокой жаропрочностью, достигаемой в основном в результате легирования алюминием и титаном. Практически из всех термоупрочняемых сплавов в силу их химического состава изготавливают детали только путем литья, что позволяет создать развитую внутреннюю полость в рабочих и сопловых лопатках для их эффективного охлаждения. Из термоупрочняемых сплавов, применяемых в промышленном газотурбостроении, наиболее распространены ЭИ 698, ЧС 104, ЭП 99, ЭП 202 и др. Их структура состоит из γ -раствора, γ -фазы типа $Ni_3(Al, Ti)$, объемная доля которой может составлять приблизительно 50...60 % карбидов (Me_6C и др.), карбонитридов ($Ti(C, N)$) и боридов (Me_3B_2 и др.) [1–4].

Производство газовых турбин невозможно без сварки, которая является наиболее экономным способом соединения деталей без увеличения их массы. При этом необходимо выполнение следующих операций: заварки дефектов литья, электронно-лучевой сварки (ЭЛС) валов с роторами, сварки лопаток в «пакеты», упрочнение торцов перьев рабочих лопаток износостойкими сплавами и др. Сварка гомогенных сплавов особых затруднений не вызывает. Однако термоупрочняемые сплавы в большинстве принадлежат к несвариваемым либо ограниченно свариваемым конструкционным материалам, поскольку отличаются склонностью к образованию трещин в шве и околошовной зоне

(ОШЗ) при сварке, термической обработке и высокотемпературной эксплуатации (рис. 1). Образовавшиеся на любом из этих этапов микротрещины продолжают свой рост при рабочей нагрузке. Весьма сложной является также задача получения металла швов, близкого по составу к основному, поскольку из-за высокой жаропрочности он отличается склонностью к образованию горячих трещин [2–7]. Все выше перечисленное относится к сварке плавлением, для которой характерен концентрированный нагрев, создающий значительные градиенты температур в зоне термического влияния.

В значительной степени избежать трещин можно с помощью применения вакуумной пайки высокотемпературными припоями или сварки без расплавления основного металла, например диффузионной сварки. Указанные выше способы получения соединений отличаются тремя основными недостатками — низкой производительностью процесса, невозможностью получения сварных соединений различной геометрии и необходимостью применения сложного оборудования. В настоящее время сварка плавлением является самым распространенным и экономным способом получения соединений. Для соединения высоколегированных сплавов широко применяется аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. В этой связи особый интерес представляют способы повышения трещиностойкости и получения сварных соединений, равнопрочных с основным металлом.



Рис. 1. Характерный вид горячей трещины, возникшей в ОШЗ и распространившейся в металл шва (X100)

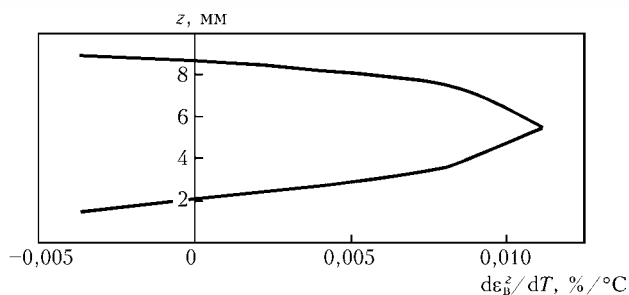


Рис. 2. Распределение темпа деформации $d\epsilon_v^z/dT$ по толщине листа при сварке за один проход электронным лучом при погонной энергии $q/v = 6270$ Дж/см [9] (ϵ_v — внутренняя деформация по оси z)

Как известно, причиной образования горячих трещин при сварке (для сплавов на никелевой основе характерен именно такой вид разрушения) являются растягивающие напряжения, возникающие в результате неравномерного нагрева и охлаждения свариваемого металла, а также жесткого закрепления деталей. Для всех металлов и сплавов стойкость против горячих трещин определяется температурным интервалом хрупкости, пластичностью в этом интервале и скоростью нарастания пластических деформаций. На образование горячих трещин влияет степень загрязненности сплава легкоплавкими примесями, форма провара, размер зерна основного металла и др., но основное влияние оказывает химический состав основного металла, причем ухудшение свариваемости находится в прямой зависимости от содержания в нем γ -фазы [6–8]. Согласно [7, 9, 10], именно теплофизические особенности сплавов на никелевой основе (низкая теплопроводность и высокая жаропрочность) влияют на увеличение роста растягивающих напряжений, что в свою очередь зависит от тепловложения в основной металл и толщины свариваемых листов (рис. 2).

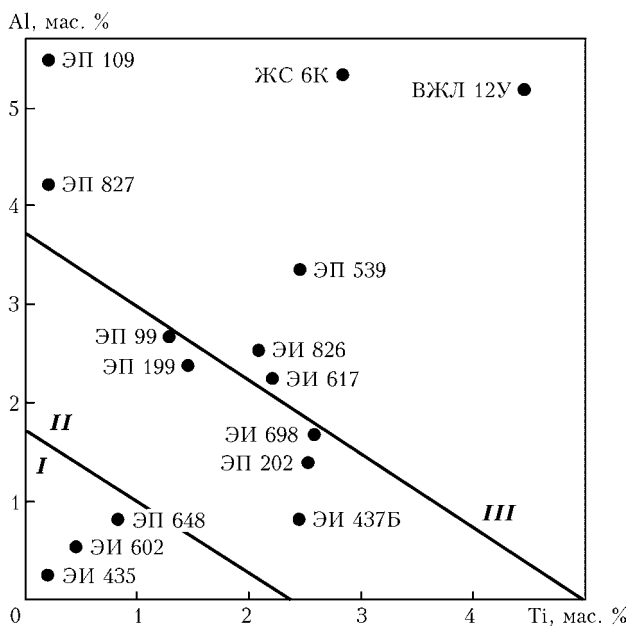


Рис. 3. Зависимость склонности никелевых сплавов к образованию трещин при термической обработке сварных соединений от содержания алюминия и титана (I–III — см. объяснения в тексте)

В работе [3], помимо отмеченного выше, обращается внимание на релаксационную стойкость. Процесс релаксации определяется переходом кристаллического тела из неравновесного состояния в равновесное, что достигается за счет снижения уровня напряжений во времени в нагруженном жестком теле с постоянными линейными размерами. Релаксация напряжений связана с переходом упругой деформации в неупругую; релаксируются лишь напряжения, превышающие предел упругости. Релаксационная стойкость жаропрочных никелевых сплавов повышается с увеличением содержания элементов, упрочняющих твердый раствор кобальтом, молибденом, вольфрамом, ниобием, но в основном при совместном упрочнении твердого раствора и выделении мелкодисперсной γ -фазы типа $Ni_3(Al, Ti)$ или фазы Ni_3Nb . С повышением релаксационной стойкости и уровня напряжений снижается стойкость сплава против образования горячих трещин в шве и ОШЗ. Ниже представлено содержание γ -фазы (об. %) в различных никелевых сплавах [3], расположенных в порядке возрастания сварочных напряжений, релаксационной стойкости и склонности к горячим трещинам:

ЭИ 437Б до 10
ЭП 708 13... 15
ЭП 693 13... 15
ЭП 199 16... 18
ЭИ 698 14... 17
ЭП 99 18... 22

В сплавах ЭИ 435, ЭИ 602 и ЭИ 868 γ -фаза отсутствует.

В работе [11] рассмотрен вопрос о трещинообразовании сварных соединений при термической обработке. Этот вид разрушения связан с суммарным действием остаточных сварочных и объемных напряжений, возникающих при выделении из твердого раствора γ -фазы, и термических напряжений. Содержание алюминия и титана является основным фактором, определяющим склонность к образованию таких трещин. По аналогии с работой [2] построена диаграмма для оценки склонности отечественных сплавов к образованию трещин при сварке и термообработке сварных соединений (рис. 3) (на рисунке приведены не все сплавы, указанные в оригинале).

По этому признаку никелевые сплавы разделены на три группы. К I группе относятся гомогенные и слабостареющие сплавы с содержанием γ -фазы не более 3...5 об. %, не склонные к образованию трещин при сварке и термической обработке. Во II группу входят дисперсионно-твердеющие сплавы с содержанием γ -фазы не более 18...20 об. %, которые характеризуются умеренной склонностью к образованию трещин. Уменьшить ее можно путем оптимизации технологии сварки и применения термической обработки по схеме: закалка, сварка, закалка, старение. В сплавах с повышенным содержанием алюминия и титана, находящихся вблизи верхней границы этой группы (ЭП 99, ЭП 199, ЭИ 698 и др.), необходимо применять перед сваркой перестаривание

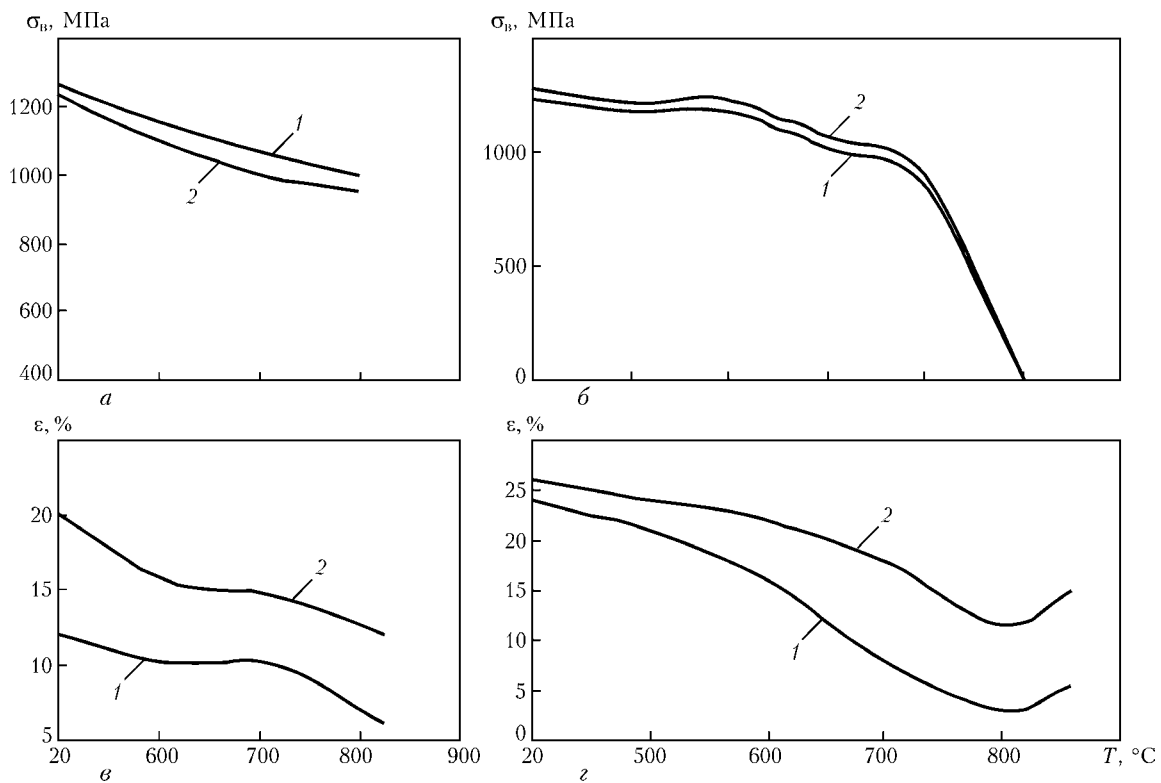


Рис. 4. Зависимость механических свойств сплавов ЭП 957 (а, в) и ЭП 800 (б, г) от температуры: 1, 2 — номера режимов (см. таблицу) [13] ($\sigma_{\text{в}}$ — временное сопротивление; ϵ — относительное удлинение)

(900... 950 °С, 5... 10 ч). В III группу входят жаропрочные никелевые сплавы с содержанием γ' -фазы более 20... 25 об. %. В сплавах, расположенных у нижней границы этой группы (ЭИ 617, ЭИ 826 и др.), необходимо применять многоступенчатое перестаривание, а с содержанием γ' -фазы свыше 45 об. % — сопутствующий подогрев свыше 950... 1000 °С.

О положительном влиянии перестаривания на свариваемость и устойчивость против образования термических трещин в дисперсионно-твердеющих сплавах отмечается также в работах [2–4, 12]. Перестаривание может выполняться посредством ступенчатого старения или аустенизации с замедленным охлаждением [12]. При этом в сплаве выделяются крупные частицы γ' -фазы, что приводит к снижению жаропрочности, релаксационной стойкости и повышению пластичности основного металла.

Необходимость увеличения срока эксплуатации ГТУ требует изыскания новых режимов термической обработки жаропрочных никелевых сплавов, способствующих повышению кратковременной прочности, ударной вязкости и стабильности структуры сплавов без снижения их жаропрочных характеристик. С этой целью для трех промышленных никелевых сплавов (ЭП 957, ЭП 800 и ЭК 78)

авторами работы [13] опробованы режимы термообработки с замедленным охлаждением после аустенизации и многоступенчатым старением, которые представлены в таблице. В указанной работе утверждается, что оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств в широком температурном интервале достигается в процессе двухступенчатого охлаждения после аустенизации — на первом этапе со скоростью 1,5... 5,0 °С/мин, на втором — на воздухе (рис. 4). При этом образуются зерна с извилистой (зубчатой) границей, что связано с выделением упрочняющей γ' -фазы в виде крупных частиц, декорированных мелкими карбидами MeC , Me_6C и Me_{23}C_6 . После аустенизации с замедленным охлаждением осуществляют заключительное старение сплавов.

Как уже упоминалось выше, достичь получения сварных соединений с жаропрочностью на уровне основного металла весьма сложно из-за высокой склонности металла шва к горячим трещинам. Использование в качестве присадки проволок из основного металла усиливает образование трещин в сварных соединениях (рис. 5). Если из состава присадочных проволок исключить титан и алюминий, то повышается стойкость сварных соединений против образования трещин, что связано с повышением релаксационной способности сварных

Режимы термообработки сплавов ЭП 957 и ЭП 900

Сплав	1-й режим	2-й режим
ЭП 957	1180 °С, 3 ч + 1050 °С, 2 ч + 950 °С, 2 ч + 850 °С, 5 ч (промежуточное охлаждение на воздухе)	1180 °С, 3 ч (охлаждение с печью в течение 30... 45 мин до 1030 °С, затем на воздухе) + 850 °С, 15 ч (охлаждение на воздухе)
ЭП 800	1150... 1180 °С, 5 ч + 1050 °С, 2 ч + 1000 °С, 2 ч + 900 °С, 2 ч + 850 °С, 2 ч (промежуточное охлаждение на воздухе)	1160 °С, 3 ч (охлаждение с печью в течение 60... 90 мин до 950 °С, затем на воздухе) + 850 °С, 15 ч (охлаждение на воздухе)

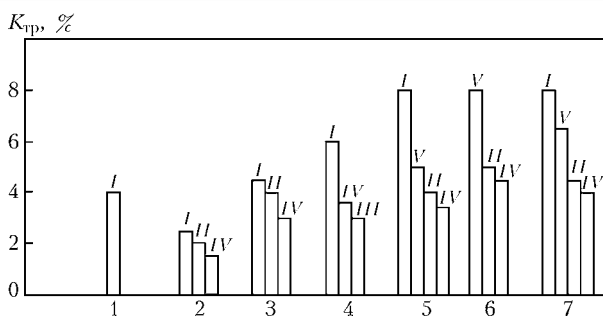


Рис. 5. Стойкость $K_{тр}$ жаропрочных сплавов ХН78Т (1), ХН75МБТЮ (2), ХН60ВТ (3), ХН50ВМТЮБ (4), ХН30ВМТ (5), ХН45МВТЮБР (6) и ХН65ВМБЮ (7) против образования горячих трещин при сварке проволоками из основного металла (I), Св-06Х15Н60М15 (II), Св-Х11Н60М23 (III), Св-ХН64КБМЮВФ (IV) и Св-08Х20Н57М8В8Т3Р (V) [14]

соединений и отсутствием (или снижением) в металле шва выделения γ' -фазы при повторном нагреве [14]. При этом прочность сварных соединений не превышает 0,85...0,90 прочности основного металла (рис. 6) [12].

Согласно работам [12, 14], наилучшее сочетание прочности и коррозионной стойкости сварных соединений обеспечивает проволока ЭП 533, которая однако значительно уступает проволокам ЭИ 683, ЭП 648, ЭП 367, ЭП 595 и ЭК 22 (с заниженным содержанием алюминия и титана или без них) по стойкости металла шва против образования горячих трещин.

Следует отметить, что в литературе широко и подробно освещены проблемы обеспечения трещиностойкости и равнопрочности сплавов с далеко не самым высоким содержанием γ' -фазы в их структуре (до 29 об. %). Менее подробно рассмотрены сплавы III группы (см. рис. 3), отличающиеся высокой склонностью к трещинам. Исследование присадочной проволоки ЭП 533, содержащей 12 об. % γ' -фазы, не может обеспечить равнопрочность сварных соединений сплавов указанной группы.

Сплавы с высокой суммарной долей этих элементов (ЖС6У-ВИ, ЖС6К, ЖС26, ЧС 70, ЧС 88, ЧС 104ВИ, IN 738LC, 713С и др.), отличающиеся значительным содержанием γ' -фазы (суперсплавы) в своей структуре, считаются несвариваемыми, если не использовать специальные приемы. Так, в работе [15] для получения швов без трещин при сварке таких сплавов рекомендуется выполнять сварку с подогревом до 600 °С (аргонодуговая сварка) и до 900 °С (ЭЛС). Авторы другой работы [16] утверждают, что при ЭЛС сплава IN 738LC возможно получение швов без трещин при подогреве до 1120 °С как при использовании присадочного металла, так и без него. В работе [17] показано, что склонность к образованию трещин сплава 713С уменьшается с увеличением вложенной энергии и понижением скорости сварки. Изложенные в указанных работах результаты имеют важное значение. Однако следует помнить, что они получены в идеальных условиях, которые далеко не соответствуют условиям ремонтной технологии, когда для устранения дефектов каждого типа необходим свой подход.

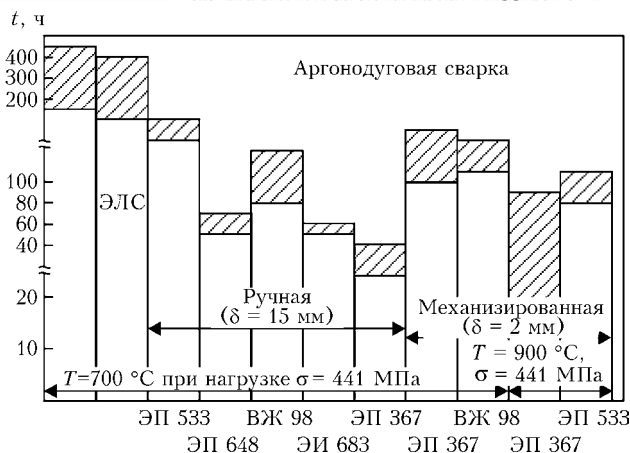


Рис. 6. Время до разрушения соединений сплава ЭП 202, выполненных аргонодуговой сваркой с использованием различных типов присадочных проволок и ЭЛС: заштрихованные области – разброс значений [12]

Из изложенного выше можно заключить, что несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию свариваемости высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов, эту проблему нельзя считать решенной. Все рекомендации, имеющиеся в литературе советской и стран СНГ, касаются металла с достаточно низким содержанием алюминия и титана, а значит, и γ' -фазы. Объектам с более высоким содержанием γ' -фазы посвящены работы американских исследователей [15–17], но и они не дают рекомендаций, применимых для практического применения.

Еще предстоит выяснить, исчерпаны ли резервы повышения пластичности сплавов с высоким содержанием γ' -фазы, а также исследовать влияние тепловложения и присадочного металла с принципиально новой системой легирования на склонность швов к образованию трещин.

1. Колачёв Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 416 с.
2. Симс Ч., Хагел В. Жаропрочные сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — 568 с.
3. Сорокин Л. И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Свароч. пр-во. — 1999. — № 12. — С. 11–17.
4. Волченко В. Н. Сварка и свариваемые материалы. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
5. Сорокин Л. И. Оптимизация ремонтной технологии деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов // Свароч. пр-во. — 1997. — № 1. — С. 19–23.
6. Землин В. Н. Жаропрочность сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1972. — 272 с.
7. Патон Б. Е. Технология сварки металлов и сплавов плавлением. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
8. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1966. — 430 с.
9. Анализ термодинамических процессов в зоне термического влияния при сварке жаропрочного никелевого сплава / В. Е. Эйдельштейн, Б. Ф. Якушин, В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко // Автомат. сварка. — 1980. — № 1. — С. 11–15.
10. Влияние физических характеристик литых никелевых сплавов на развитие термодинамических процессов при сварке плавлением / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, В. И. Махненко и др. // Там же. — 1993. — № 11. — С. 6–9.
11. Сорокин Л. И., Тутикин В. И. Классификация жаропрочных никелевых сплавов по их стойкости против образования трещин при термической обработке сварных соединений // Там же. — 1985. — № 5. — С. 23–25.



12. *Квасницкий В. Ф.* Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении // Там же. — 1985. — № 10. — С. 26–30.
13. *Филатова М. А.* Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1995. — № 6. — С. 12–15.
14. *Сорокин Л. И., Багдасаров Ю. С., Тушкин В. И.* Сравнительная оценка присадочных проволок для аргонодуговой сварки жаропрочных сплавов // Свароч. пр-во. — 1993. — № 10. — С. 31–33.
15. *Haafkens M. H., Matthey J. H. G.* A new approach to the weldability of nickel-base as-cast and powder metallurgy superalloys // Welding J. — 1982. — Nov. — P. 25–30.
16. *Jahnke B.* High-temperature electron beam welding of the nickel-base superalloy IN-738LC // Ibid. — P. 343–347.
17. *Improving the weldability of Ni-base superalloys 713C* / A. Koren, M. Roman, I. Weisshaus, A. Kaufman // Ibid. — 1982. — Nov. — P. 348–351.

Causes of hot cracking of the weld metal in fusion welding of high-alloy heat-hardenable nickel-base alloys have been analysed. It is shown that recommendations available in literature on elimination of cracks are applicable only for alloys with a low content of the γ -phase. Ways of solving this problem for alloys with a high content of aluminium and titanium are noted.

Поступила в редакцию 13.05.2004,
в окончательном варианте 08.10.2004

ЭЛС РЕБРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ (РАДИАТОРОВ) ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Разработана экологически чистая безотходная технология изготовления высокоэффективных теплообменных аппаратов из алюминия и его сплавов. Это позволяет уменьшить в 3...4 раза весовые характеристики радиаторов по сравнению с обычными из меди или латуни, улучшить на 40...60 % их теплотехнические показатели. Использование электронно-лучевой сварки при соединении оребренных трубчатых элементов с трубной доской



обеспечивает равнопрочность сварных соединений с основным металлом, практически полное отсутствие деформации и сохранение в исходном состоянии жесткости тонкостенных ребер.

Основные операции разработанной технологии являются экологически чистыми и легко поддаются автоматизации и механизации.

Область применения. Алюминиевые теплообменники (радиаторы) могут применяться в автомобиле- и тракторостроении, авиационной промышленности, холодильных установках или компрессорных станциях, кондиционерах и т. д.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 7
Тел.: (38044) 287 44 06, факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30