



УДК 621.791.14

## СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (Обзор)

**Е. В. СЕРГЕЕВА**

«HSC Consulting». Ginsterweg, 1a, 21407, Deutsch Evern, Germany. E-mail: sergeev.dr@t-online.de

Сварка трением с перемешиванием (СТП) находит все более широкое применение в промышленности, особенно при производстве новой техники. В обзоре представлены примеры современного применения СТП в авиакосмической отрасли. Они дают представление о существующих сегодня возможностях процесса и основных направлениях развития технологии СТП. Применение СТП в авиакосмической отрасли позволяет снизить вес летательных аппаратов, сократить на 65 % число заклепочных соединений, соединять не свариваемые известными способами материалы, автоматизировать контроль соединений. Библиогр. 10, рис. 7.

*Ключевые слова:* сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, авиакосмическая отрасль, преимущества применения, снижение веса, гибкость и автоматизация, повышение производительности

Говоря о применении сварки трением с перемешиванием (СТП) в авиакосмической промышленности, можно взять данные о любой из ведущих мировых корпораций, связанной с производством самолетов, ракет, космических станций, и найти многочисленные упоминания о применении этой технологии сварки и ее преимуществах.

Почему именно СТП находит все более широкое применение в авиакосмической промышленности? Почему мировые концерны вкладывают немалые средства в эту технологию? Например, корпорация «Boeing» инвестировала 15 млн дол. США в СТП только для сварки баков ракет-носителей. В публикуемом обзоре автор делает попытку ответить на поставленные вопросы и систематизировать существующие на сегодняшний день применения и основные направления развития технологии СТП в авиакосмической промышленности (рис. 1).

**Процесс СТП.** СТП была изобретена и запатентована The Welding Institute (TWI) в декабре



Рис. 1. Первый испытательный полет самолета «Eclipse 500» (при изготовлении использовали СТП) [1]

1991 г. TWI успешно подал заявки на патенты в Европе, США, Японии и Австралии.

Принцип СТП предельно прост (рис. 2). Цилиндрический вращающийся инструмент особой формы с заплечиками и штырем в центре погружается в линию соединения подлежащих сварке и плотно прижатых друг к другу деталей. Получаемое при этом количество тепла достаточно для пластической сварки деталей без плавления. Нагретый до пластического состояния металл перемещается из зоны перед штырем в зону за ним, формируется заплечиками и при охлаждении образует сварное соединение.

**Применение СТП в авиакосмической промышленности.** В аэрокосмической промышленности СТП находит все большее применение для сварки корпусных деталей, приварки поперечных и продольных ребер жесткости, а также производства:

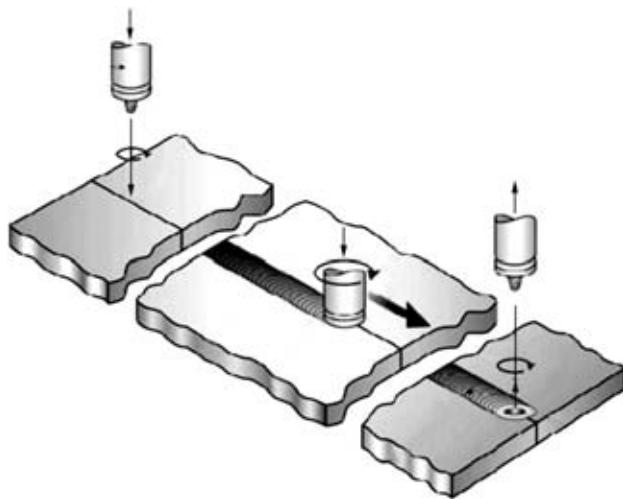


Рис. 2. Схема процесса СТП согласно DIN EN ISO 25239-1

© Е. В. Сергеева, 2013

крыльев, фюзеляжей, хвостового оперения самолетов;

криогенных топливных баков космических кораблей;

топливных авиационных баков;

внешних топливных баков одноразового использования для военных самолетов;

деталей ракет военного и научного назначения.

Еще одна область применения СТП — исправление дефектов сварных швов, полученных дуговой сваркой.

Производство этих конструктивных компонентов с применением способа СТП является более экономичным по сравнению с заклепочными соединениями и фрезерованием из цельного металла. Возможна сварка листов из доступных материалов с последующим формообразованием.

Применение СТП существенно повышает конкурентоспособность изделий, поэтому информация о практических приложениях этой технологии сварки и фактических прибылях широко не афишируется. Однако из материалов конференций и симпозиумов по сварочным технологиям [2, 3] можно получить общее представление о преимуществах использования СТП, основные из которых перечислены ниже:

возможность промышленного изготовления сборочных узлов с высокой степенью готовности; высокий уровень повторяемости и воспроизводимости, а также обеспечение качества при минимальных отклонениях;

гибкость и функциональные возможности промышленного оборудования, позволяющие разрабатывать новые решения в кратчайшие сроки.

Как правило сварные узлы и изделия в целом могут быть проверены и утверждены такими компетентами учреждения, как DNW, RINA и «Germanischer Lloyd».

**Причины все более широкого применения СТП в аэрокосмической промышленности.**

*Снижение веса летательных аппаратов.* Основным фактором, определяющим все более широкое применение СТП в авиакосмической промышленности, является снижение веса. Чем выше скорость летательного аппарата, тем более выгодным является снижение его веса. Можно установить практически прямо пропорциональную зависимость между весом летательных аппаратов и экономичностью их применения (рис. 3) [4]. На графике показана зависимость потенциальных сбережений за счет экономии топлива из расчета один или два доллара за галлон на 100 тыс. миль пути.

Экономичность самолетов повышается за счет экономии топлива. Расчет был сделан на 100000 — часовой срок службы фюзеляжа. Для космических кораблей стоимость фунта полезного груза на орбите составляет 20 тыс. дол. США. Для корабля многократного использования «Space Shuttle» эта стоимость уменьшается до 10 тыс. дол. США за фунт.

Использование СТП при производстве коммерческого самолета «Eclipse 500» [5, 6] позволяет снизить его вес на 50 фунтов. Стоимость топлива этого самолета составляет 89 дол. США на фунт веса в час. Таким образом, минимизация средств на каждом сэкономленном сваркой фунте из расчета на 100 тыс. ч составляет 7 тыс. дол. США, за 50 фунтов — 350 тыс. дол. США. Те же расчеты можно провести для военных самолетов.

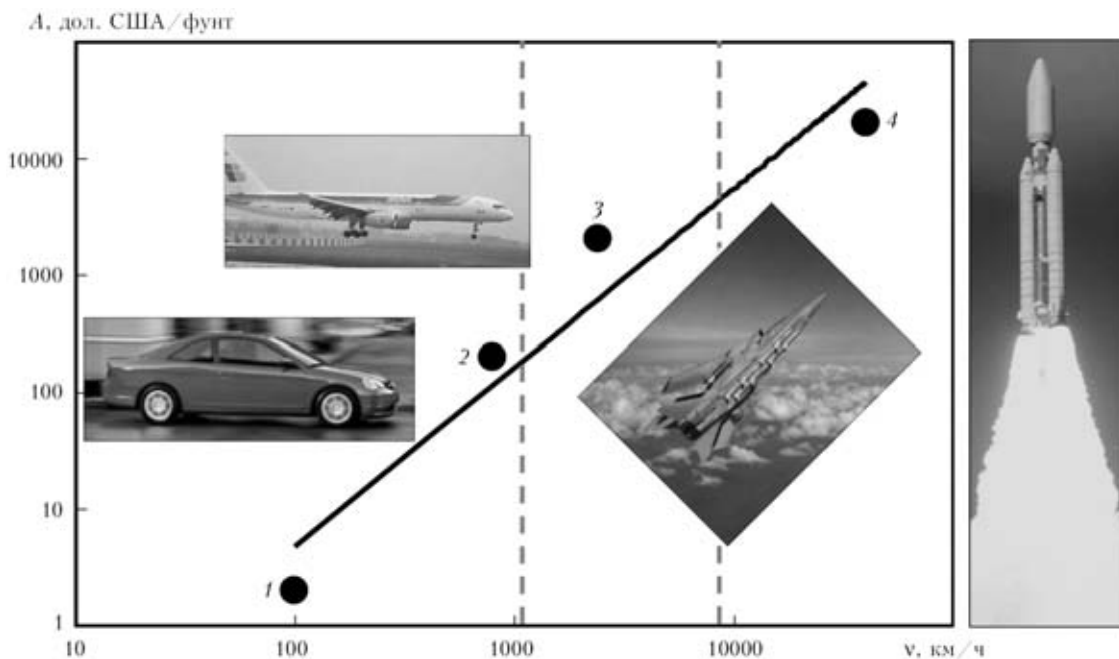


Рис. 3. Влияние снижения массы на экономичность эксплуатации *A* автомобиля и авиакосмической техники в зависимости от скорости их полета *v*, [4]: 1 — автомобиль; 2 — самолет; 3 — военный самолет; 4 — ракета



Использование алюминий-литиевых сплавов при производстве топливных резервуаров ракет-носителей «Space Shuttle» позволило снизить их вес на 7500 фунтов, что в переводе на денежные средства означает экономию 75 млн дол. США за запуск. Эта цифра определяется увеличением полезного груза [7].

*СТП: сварные швы вместо заклепочных соединений.* К числу особо важных для авиакосмической промышленности преимуществ СТП следует отнести тот факт, что ее применение делает ненужными миллионы заклепок.

Технология СТП была впервые применена в 2002 г. при производстве реактивного воздушного судна «Eclipse 500» (рис. 1, 4, 5) [6].

Согласно сообщениям руководства, применение СТП позволило на 65 % сократить число заклепочных соединений. При производстве каждого самолета СТП используется для сварки 135-ти погонных метров сварных швов кабины, фюзеляжа, крыльев, мотора. СТП применяют также в местах крепления ребер жесткости и стрингеров. Сварку производят в автоматическом режиме. В результате устраняют в общей сложности 30 тыс. заклепок, при этом возможно конструктивное исполнение с более быстрым и простым монтажом. Технология СТП позволяет соединять конструктивные компоненты корпуса самолета в четыре раза быстрее, чем автоматизированная клепка, и в 20 раз быстрее, чем ручная. Внутреннее обустройство кабины и салона до состояния готовности к полету занимает не более полутора часов, в готовый каркас корпуса самолета остается только установить кресла.

Время монтажа самолета «Eclipse 500» от момента установки деталей корпуса в крепежные приспособления оборудования СТП до момента выезда готового изделия (с мотором, интерьером и т. д.) из двери ангара сокращается до девяти

дней. Если добавить к этому время на производственные испытания и окрасочные работы, общее время производственного цикла от старта первого сварного шва до полной готовности к взлету составляет три недели.

Еще более важное сообщение от корпорации «Boeing»: СТП была успешно применена в 73-х проектах. Обычные способы сварки связаны с применением заклепок и материалов-наполнителей, что неизбежно связано с увеличением веса летательных аппаратов. Корпорация «Boeing» использует миллионы заклепок. Каждый день нужно просверлить и заполнить 1,1 млн отверстий. Стоимость каждого отверстия с учетом затрат на разработку конструкции, сверление, заполнение и контроль составляет 5...10 дол. США. Экономичность СТП очевидна [8].

*Применение СТП при сварке двух различных материалов, не свариваемых другими способами.* Снижение веса летательных аппаратов, в производстве которых была применена СТП, связано не столько с отсутствием заклепок, сколько с возможностью сварки сплавов алюминия, не свариваемых другими способами. С помощью СТП можно сваривать высокопрочные сплавы алюминия 7XXX и 2XXX. При использовании более прочных сплавов требованиям прочности корпусов летательных аппаратов отвечают более легкие компоненты конструкции со стенками меньшей толщины и фланцами меньшей ширины.

Развитие технологии СТП с начала 90-х годов является одной из причин все более широкого распространения сплавов Al-Li в авиакосмической промышленности, например, AA2195 и AA2198. Литий имеет более низкий по сравнению с алюминием удельный вес, его присутствие снижает удельный вес сплава при одновременном улучшении механических характеристик. Сплавы Al-Li используют в производстве топливных резервуаров ракет-носителей «Space Shuttle» и «Falcon 9» (рис. 6), а также в производстве конструктивных компонентов фюзеляжа «Airbus A350 XWB».

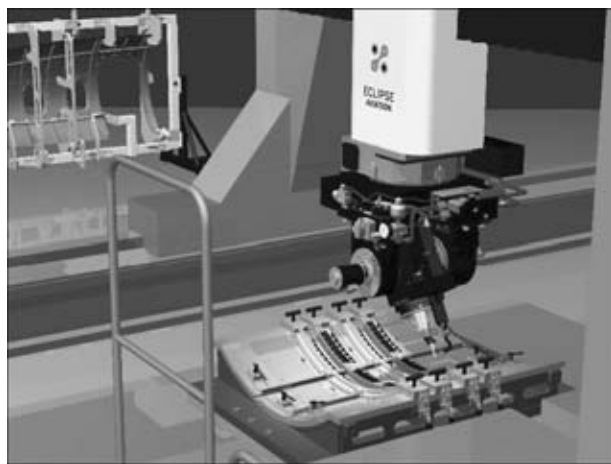


Рис. 4. СТП конструктивных компонентов «Eclipse 500» на порталном станке (режим доступа: [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/Images/Eclipse-fsw\\_tooling\\_tcm1023-21267.jpg](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/Eclipse-fsw_tooling_tcm1023-21267.jpg))



Рис. 5. Устранение заклепочных соединений швов внахлестку при применении СТП (режим доступа: <http://www.dvs-ev.de/lvmv/downloads/schweibote0207.pdf>)



Рис. 6. Резервуар ракеты-носителя «Falcon 9» из алюминиево-литиевого сплава (предприятие «SpaceX»), продольные и круговые швы которого сделаны с помощью СТП. При этом полностью исключается формирование водородных пузырей (режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:SpaceX\\_factory\\_Falcon\\_9\\_booster\\_tank.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:SpaceX_factory_Falcon_9_booster_tank.jpg))

*Исключение дорогостоящих операций контроля сварных соединений.* Газовая дуговая сварка связана с плавлением металлов и возникновением газовых пузырей внутри сварных швов. Это, в свою очередь, требует больших затрат на устранение дефектов. Поэтому, например, корпорация «Boeing» решила заменить газовую дуговую сварку СТП, использование которой полностью исключает возникновение внутри металла шва водородных пузырей. Применение СТП исключило дорогостоящий рентгенографический контроль, так как проверка 8900 м сварных швов, полученных с применением СТП, показала полное отсутствие дефектов [9].

*Контроль параметров процесса СТП для предотвращения дефектов сварных швов.* Актуальность задач снижения стоимости и веса летательных аппаратов, улучшения качества сварных швов очевидна. Человеческий фактор при производстве ракет и самолетов может иметь необратимые последствия, поэтому понятно стремление автоматизировать процесс сварки и контролировать его параметры, увеличивая при этом скорость сварки и радикально снижая время производственного цикла. Параметры процесса СТП аналогичны параметрам процесса обработки резанием: скорость вращения шпинделя, подача — скорость сварки, толщина свариваемых деталей, наклон инструмента к поверхности детали, геометрия инструмента, а также предварительный подогрев деталей, конструкция зажимных устройств.

Задача контроля параметров процесса резания успешно решена в современном машиностроении. Существует достаточное количество предприятий, которые выпускают системы контроля перечисленных выше параметров процесса резания, их обрабатывающие центры надежно работают в составе автоматических линий. При любом выходе параметров из поля допуска предусмотрены



Рис. 7. Отслеживание сварного шва на портальном обрабатывающем центре HAGEMATIC 305 FSW для обработки резанием и СТП

эффективные действия по выяснению и устранению причин сбоя. Процесс СТП можно контролировать с помощью тех же методов и систем, которые применяют для контроля параметров процесса резания.

Так, например, на оборудовании фирмы «HAGE Sondermaschinenbau GmbH», управление процессом СТП проводят посредством контроля осевой нагрузки или скорости подачи сварочной головки (рис. 7).

При сварке с постоянной нагрузкой измерительная система контролирует заданное значение действующей осевой нагрузки. При этом ведется наблюдение за отклонением перемещений от заданных значений, при превышении допуска обрабатывающий центр останавливается.

При сварке с постоянной подачей сварочной головки сварку проводят с постоянной скоростью, как при фрезеровании. Возникающие силы меняются в зависимости от неравномерности свойств материала. При этом с помощью измерительной системы ведется наблюдение за отклонением осевой нагрузки от заданных значений, при превышении допуска обрабатывающий центр останавливается.

Переключение режимов контроля проводят вручную или с помощью управляющей программы ЧПУ. Например, в начале и конце сварного шва, когда сварку проводят с постоянной силой. Ограничивающим фактором применения СТП являются высокие осевые нагрузки и высокие силы прижима свариваемых деталей. Необходимы специальные прижимные устройства и специальная оснастка. Для решения этой проблемы идеально подходит опыт «HAGE Sondermaschinenbau GmbH» по разработке и производству пятиосевых портальных обрабатывающих центров для обработки деталей из сплавов стали и алюминия. Необходимые устройства загрузки, зажима, подачи, разжима и разгрузки деталей конструируют и изготавливают «под ключ» на одном предприятии. Каждое сконструированное зажимное устройство обеспечивает надежность при длительной эксплуатации.



*Гибкость процесса СТП и простота монтажа конструктивных компонентов после сварки. Оптимизированная к материалу и форме деталей геометрия инструмента, параметры процесса сварки и специальная оснастка позволяют производить сварку швов практически любой пространственной конфигурации. Одно из наиболее убедительных преимуществ СТП — конструктивные компоненты готовы к сборке сразу после сварки. Затраты на шлифование, полирование, выравнивание исключены.*

Применение СТП позволило более чем наполовину снизить затраты на сварочные работы при производстве ракет «Delta II» и «Delta IV» [10]. Из материалов отчета фирмы «Boeing» для TWI следует, что применение СТП при производстве ракет «Delta IV» и «Delta II» позволило сократить их стоимость на 60% и уменьшить время производственного цикла с 23-х до 6-ти дней.

СТП также применяют для сварки внешнего бака «Шаттла», для «Ares I» и для стенового образца «Orion Crew Vehicle» в НАСА, а также для сварки ракет от «Falcon 1» до «Falcon 9» в «SpaceX». В авиастроении СТП была впервые применена для «Boeing C-17 Globemaster III» и «Boeing 747 Large Cargo Freighter». Панели перекрытия военного самолета «Airbus A400M» также сварены с применением СТП.

Federal Aviation Administration на год раньше запланированного срока одобрила применение СТП для сборки самолета «Eclipse 500».

По сообщениям руководства «Airbus», применение СТП позволило уменьшить вес сварных элементов летательных аппаратов на 40 % и снизить время производственного цикла на 20 %.

По сообщениям «Eclipse 500» СТП сокращает время производственного цикла и производственные затраты. Время производственного цикла СТП снижается на 40 % относительно времени производственного цикла с заклепочными соединениями. Высокоавтоматизированная сварка СТП позволяет сэкономить от 50 до 100 тыс. дол. США на каждом самолете.

1. <http://www.twi.co.uk>.
2. <http://www.aluplanet.com/documenti/InfoAlluminio/AlGenFeb06Volpone.pdf>.
3. [http://techcon.ncms.org/Symposium2005/presentations/Tra](http://techcon.ncms.org/Symposium2005/presentations/Track%202/0810%20Florence.pdf)
4. <http://eagar.mit.edu/EagarPapers/Eagar192.pdf>.
5. [www.eclipseaviation.comhttp://www.avbuyer.com/PDFs/Eclipse\\_500\\_june04.pdf](http://www.eclipseaviation.comhttp://www.avbuyer.com/PDFs/Eclipse_500_june04.pdf).
6. [http://www.avbuyer.com/PDFs/Eclipse\\_500\\_june04.pdf](http://www.avbuyer.com/PDFs/Eclipse_500_june04.pdf).
7. <http://eagar.mit.edu/EagarPapers/Eagar184.pdf>.
8. [http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2004/septem](http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2004/september/i_tt.htm)
9. [http://www.iiwelding.org/TheIIW/Organization/Document/ISO%20Focus%2010-11\\_E%20-%20SR-NoMeltMiracle2.pdf](http://www.iiwelding.org/TheIIW/Organization/Document/ISO%20Focus%2010-11_E%20-%20SR-NoMeltMiracle2.pdf).
10. [http://en.wikipedia.org/wiki/Friction\\_stir\\_welding#Applicat](http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding#Applications)

Поступила в редакцию 06.03.2013

## **«ЭР ЛИКИД» ЗАПУСКАЕТ НОВОЕ БЕСПЛАТНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «ГАЗОВАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ» для IPAD**

*Это приложение позволяет пользователям быстро получать доступ к информации хост-системы о физических и химических свойствах 64 молекул газа (кислород, азот, водород и т. д.) в твердом, жидком и газообразном состояниях, показывает совместимость различных газов и описывает основные виды их применения в промышленности. Информация подготовлена экспертами «Эр Ликид».*

*Являясь ключевым ресурсом для научного сообщества, исследователей, студентов и преподавателей, она предназначена не только для клиентов «Эр Ликид», но и широкой общественности. «Газовая энциклопедия» для iPad предлагает многочисленные удобные функции: инструмент сравнения молекул для лабораторных работ, фильтры для исследований, эквивалентный преобразователь и систему просмотра в 3D. Приложение выпущено на французском и английском языках. «Газовая энциклопедия» для Android будет выпущена в июне этого года. Версия энциклопедии в Интернете ([encyclopedia.airliquide.com](http://encyclopedia.airliquide.com)) уже давно пользуется огромной популярностью у пользователей — 1,4 млн посещений в 2012 г.*

*«Способность адаптироваться к новым мобильным пользователям, продемонстрировать нашу научную и техническую компетенцию, вносить вклад в обмен информацией, устанавливать контакты с широкой аудиторией — это важные для нас задачи, с которыми мы успешно справляемся», — объясняет Оливье Делабруа, вице-президент по научно-исследовательской работе группы «Эр Ликид», — «и именно поэтому мы сделали данный ресурс бесплатным».*