

Сварка трением

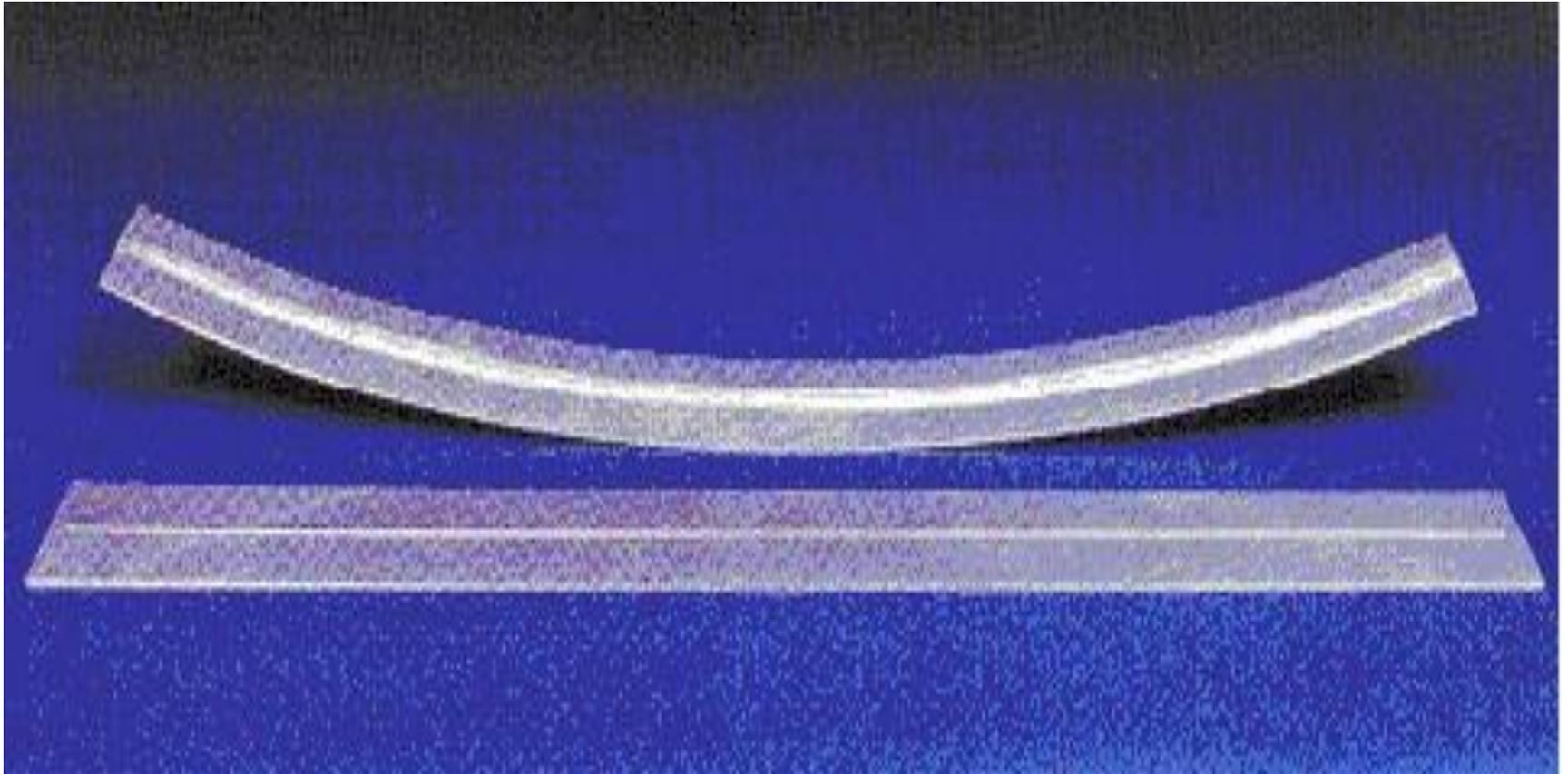
Сварка трением используется в различных отраслях машиностроительного производства более 70 лет, однако только в последние годы в связи с появлением новых типов универсального и специализированного технологического оборудования с системами программного управления процессом сварки она начинает широко применяться в основном производстве газотурбинных двигателей.

Сварка трением выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла выделяемого при трении. Большинство металлов и сплавов могут быть сварены между собой практически без потери прочности. Затруднена сварка материалов имеющих неметаллические включения, в частности, сталей содержащих серу. Параметры процесса сварки зависят от типа соединяемых материалов и отрабатываются экспериментально.

Основные преимущества сварки трением:

- - Возможность сварки деталей из материалов различной природы, не свариваемые традиционными способами;
- - При сварке наблюдается узкая нагретая зона;
- - Стабильность и процесса сварки;
- - Деталь после сварки требует минимальной механической обработки или может использоваться без нее;
- - Могут быть использованы новые конструкторские решения связанные как с формой соединяемых деталей, так и с назначением свариваемых материалов;
- - Пригодность для сварки с высокой производительностью деталей различной формы;
- - Экологическая чистота процесса;
- - поскольку сварка производится в твердом состоянии, отсутствует пористость и включения;
- - Нет необходимости в использовании электродов, флюсов, присадочного материала и защитных газов и других атрибутов, увеличивающих стоимость сварки;
- - Минимальное машинное время сварки;
- - Сквозное сваривание, обеспечивающее высокую прочность даже в тонких (критических) сечениях;
- - Экономия дорогостоящих материалов за счет возможности сваривания разнородных металлов и сплавов.
- - Малый расход энергии (25...100 Вт на квадратный сантиметр шва).

Разница изменения формы СТП и дуговой сварки

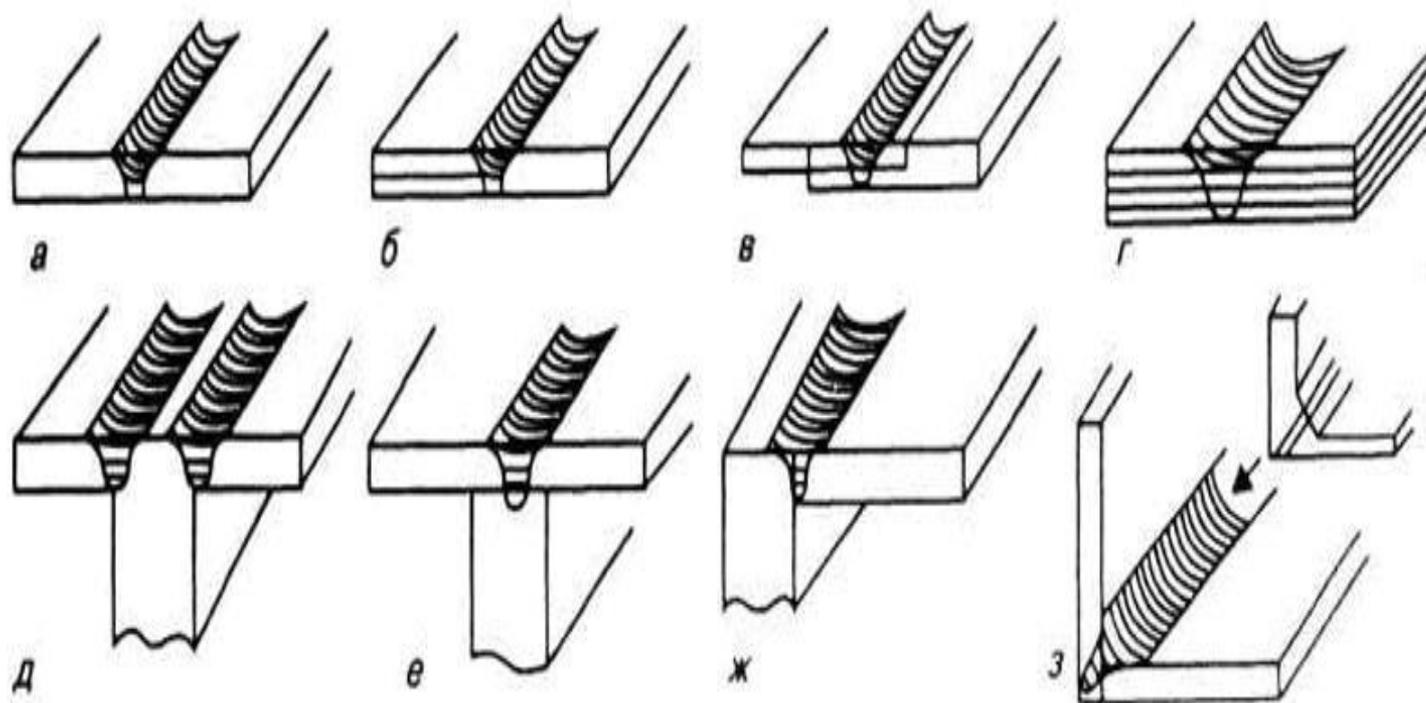


ПРИ ЭТОМ ОБЕСПЕЧИВАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ:

- Швы могут быть получены на сплавах, которые не могут быть реализованы при сварке оплавлением из-за чувствительности к образованию горячих трещин, пор и других дефектов;
- Формирование шва в твердой фазе позволяет сохранить комплекс свойств для метастабильных сплавов, таких, как добыча или сплавы, полученные быстрой кристаллизацией образующихся при применении методов СТП и НПТП;
- Можно получать сварные узлы стыковыми нахлестными швами из заготовок, изготавливаемых с помощью различных технологий (литье, прессование и др.);
- Стыки не требуют очень точной подборки кромок, так для полотен толщиной 1,6 мм зазор может быть до 0,2 мм, для плит толщиной 12,7 мм - до 1,25 мм.

Разновидности сварки трением:

- - Ротационная сварка трением (rotational friction welding);
- - Радиальная сварка трением (radial friction welding);
- - Перемешивающая сварка трением (friction stir welding);
- - Точечная сварка трением (friction stir spot welding);
- - Линейная сварка трением (linear friction welding);
- - Орбитальная сварка трением (orbital friction welding);
- - Штифтовая сварка трением (friction stitch welding).



Типы соединений, выполненных СТП:

а - стыковое б - нахлестно-стыковое; в – нахлестное;
 г - многослойное нахлестное; д - двухпроходное тавровое,
 е - тавровое прорезное; ж, з – угловое.

Перемешивающая сварка трением

- Перемешивающая сварка трением (ПСТ) является одним из новейших способов сварки (запатентована в 1991 году). Она выполняется торцом вращающегося инструмента, перемещающегося в направлении сварки (рис.1). Диаметр инструмента выбирается несколько меньшим, чем глубина сварки. Рабочая поверхность инструмента имеет специальный профиль (рис.2,3). Пластифицированный тепловыделением металл за счет сил трения закручивается относительно оси вращения инструмента. В процессе перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходит перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва. ПСТ целесообразно использовать для сварки материалов толщиной 1,6...30мм. Согласно данным компании The Welding Institute in UK (TWI) этот способ сварки трением позволяет за два прохода с разных сторон сваривать алюминиевый лист толщиной 75 мм. Технология ПСТ наиболее широко используется для сварки алюминиевых сплавов. К другим материалам, свариваемым ПСТ, относятся: медь и ее сплавы, свинец, магниевые сплавы, стали, сплавы на титановой и никелевой основах, термопластичные полимеры.

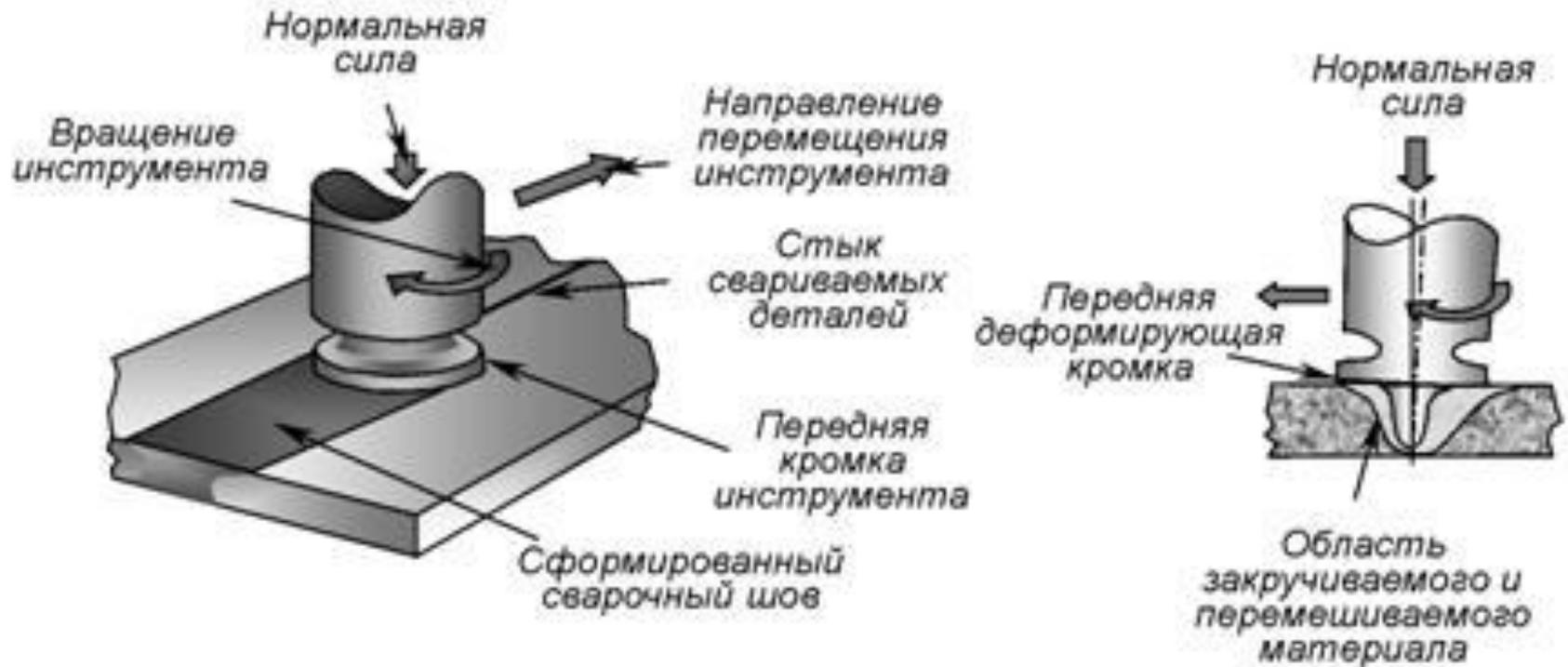
Сварка трением

- Сварка трением используется в различных отраслях машиностроительного производства более 70 лет, однако только в последние годы в связи с появлением новых типов универсального и специализированного технологического оборудования с системами программного управления процессом сварки она начинает широко применяться в основном производстве газотурбинных двигателей.
- Сварка трением выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла выделяемого при трении. Большинство металлов и сплавов могут быть сварены между собой практически без потери прочности. Затруднена сварка материалов имеющих неметаллические включения, в частности, сталей содержащих серу. Параметры процесса сварки зависят от типа соединяемых материалов и отрабатываются экспериментально.

Инструменты для ПСТ

- изготавливают из инструментальных сталей (сварка пластиков и легкоплавких металлов), быстрорежущих сталей (сварка алюминиевых и магниевых сплавов), металлокерамических твердых сплавов и минералокерамик, специальных композиционных материалов (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах). При выборе инструментального материала стремятся избежать намазывания оттесняемого металла на поверхности инструмента. Для этих целей могут быть использованы специальные покрытия.

Схема ПСТ



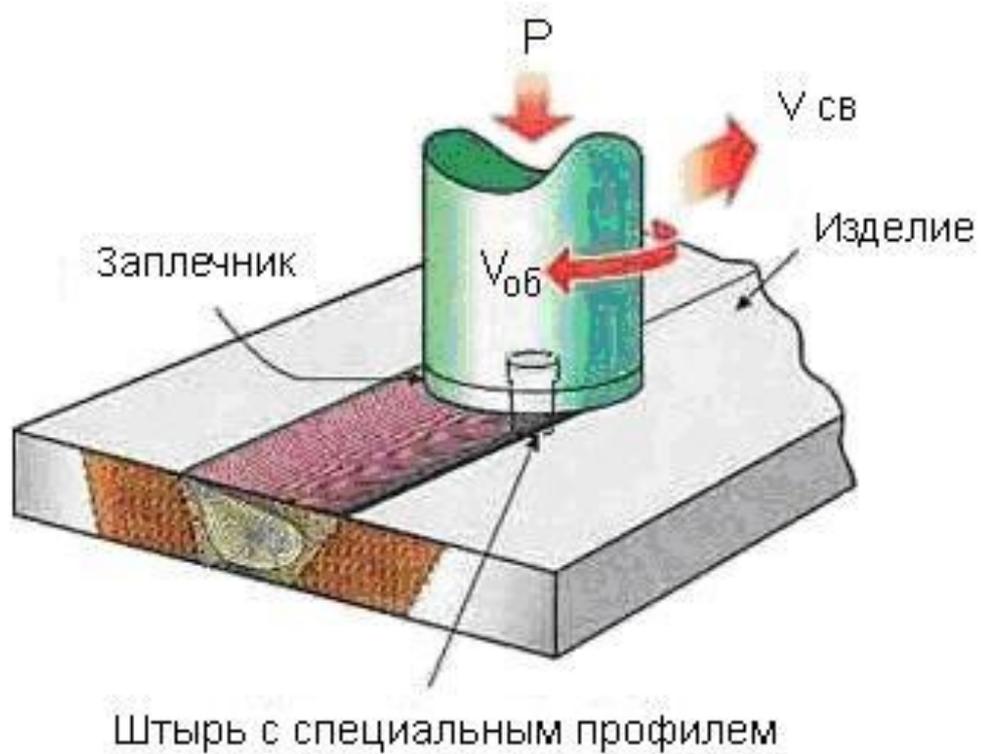
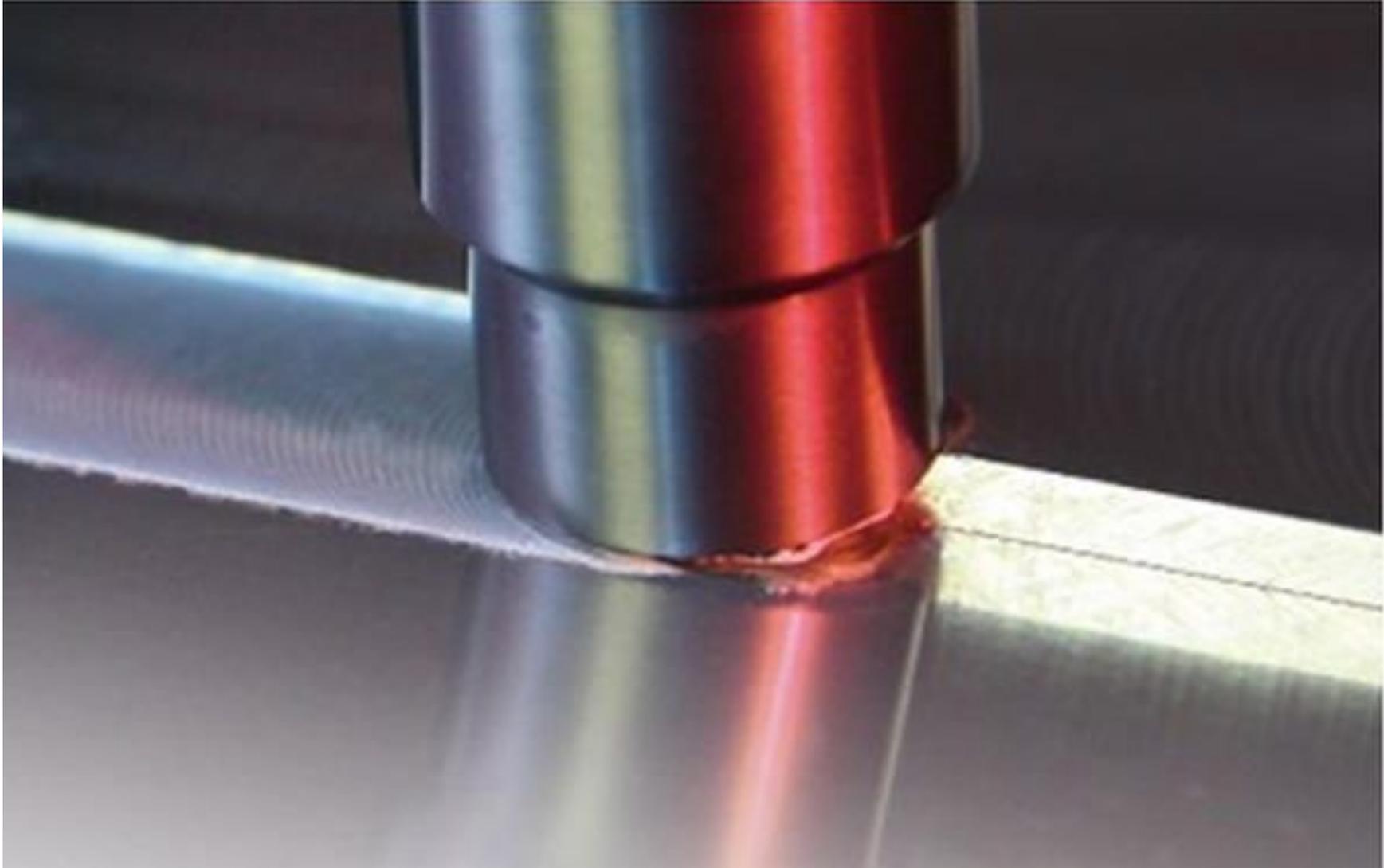
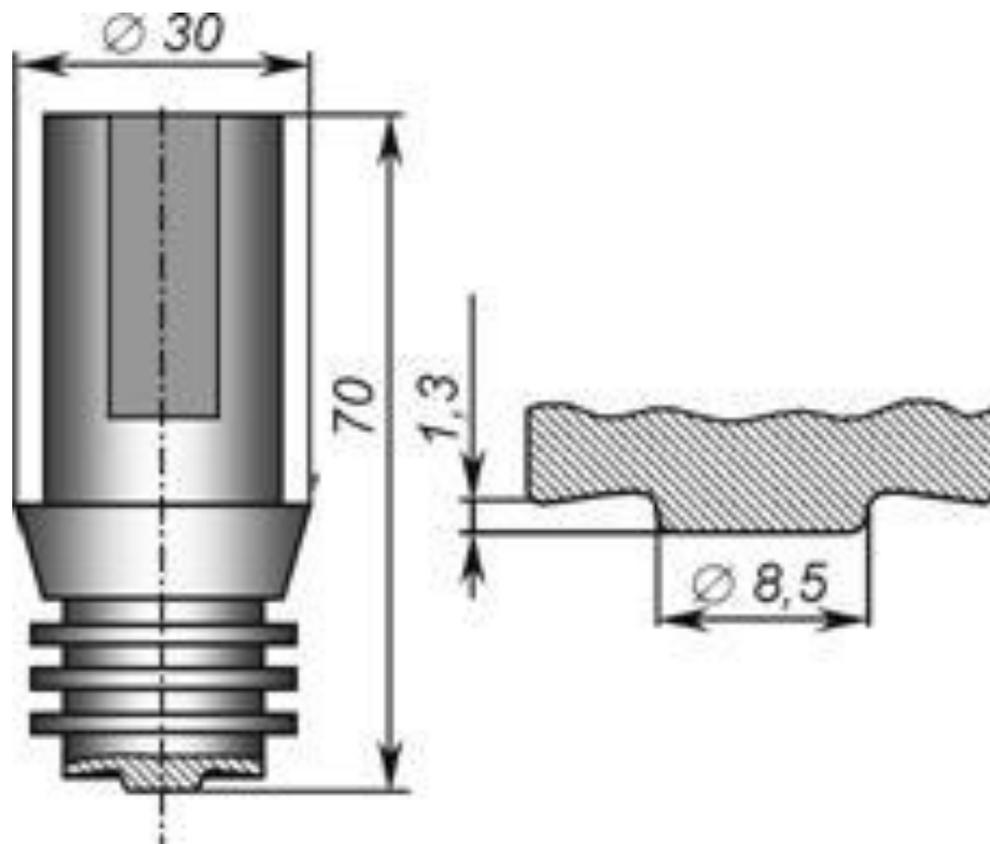


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием, где P - усилие прижатия инструмента; $V_{св}$ - скорость перемещения инструмента; $V_{об}$ - частота вращения инструмента.





Конструкция инструмента, применяемого для сварки листов толщиной 8 мм из алюминий-литиевого сплава

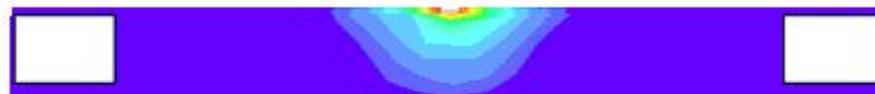


Рис. 3. Рабочие части инструментов используемых при ПСТ: а – традиционная конструкция инструмента; б – инструмент для получения глубоких швов; в – инструмент со специальной формой торца. Показан намазанный на выступ свариваемый металл

Особенности сварки

- Для процесса перемешивающей сварки трением важно, чтобы материал был достаточно сильно разогрет для перехода в пластичное состояние. В то же время нельзя допускать перегрева, иначе можно повредить инструмент и создать бракованную деталь. Главное это подобрать нужные режимы для сварки. В большинстве случаев их подбирают экспериментальным путем.

Передняя сторона инструмента



a

527.75 °C

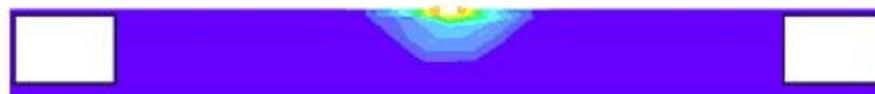
512.42 °C

Задняя сторона инструмента



Передняя сторона инструмента

1000 об/мин и подача 100 мм/мин



b

472.85 °C

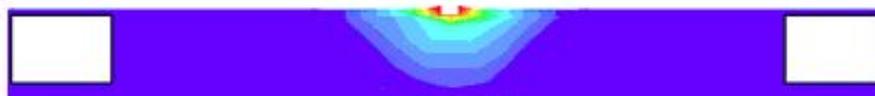
465.38 °C

Задняя сторона инструмента



Передняя сторона инструмента

1000 об/мин. подача 300 мм/мин



c

551.35 °C

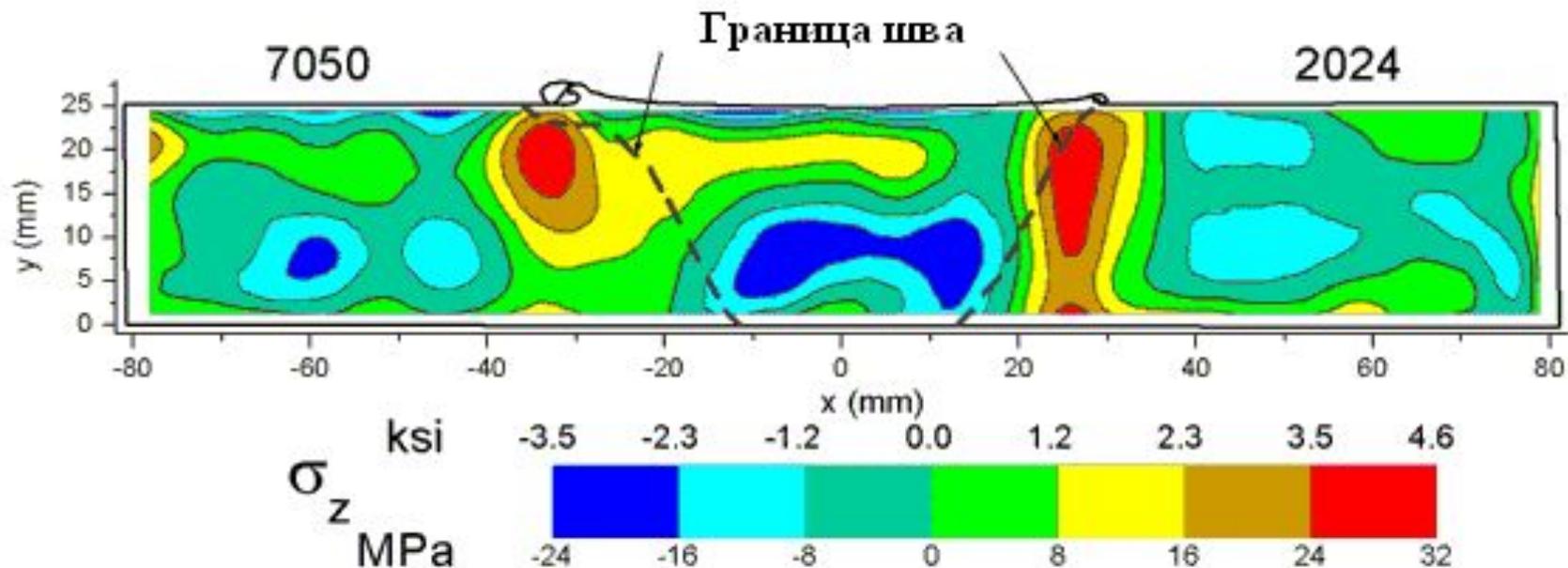
543.45 °C

Задняя сторона инструмента



1500 об/мин подача 150 мм/мин

Усталостные характеристики



Продольные остаточные напряжения сваренных друг с другом пластин из разных алюминиевых сплавов

Из-за асимметрии шва усталостные характеристики распределяются неравномерно. Как правило, для ответственных конструкций применяют такие технологические схемы движения инструмента для того, чтобы избавиться от асимметрии и избежать появления концентраторов напряжений на границах сварного шва.

Режимы сварки

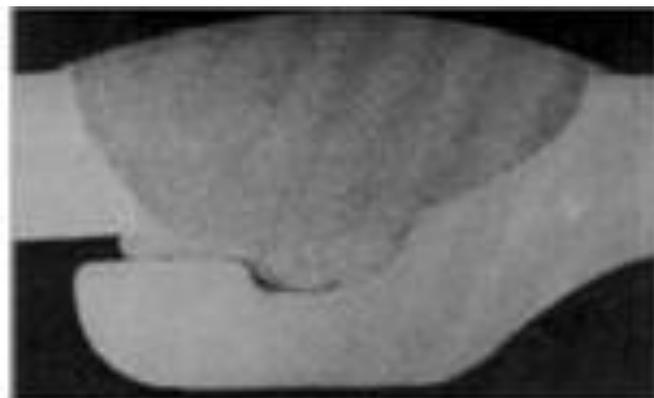
Сплав	Толщина (мм)	Материал инструмента
Алюминиевые сплавы	<12	Инструментальная сталь, WC-Co *
	<26	MP159 (никель-кобальтовый сплав)
Магниеые сплавы	<6	Инструментальная сталь, WC**
Медь и медные сплавы	<50	Никелевые сплавы, вольфрамовые сплавы, поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ)
	<11	Инструментальная сталь
Титановые сплавы	<6	Вольфрамовые сплавы
Нержавеющие стали	<6	ПКНБ, вольфрамовые сплавы
Низколегированные стали	<10	WC, ПКНБ
Никелевые сплавы	<6	ПКНБ

* WC-Co – композиционный материал, карбид вольфрама на кобальтовой матрице

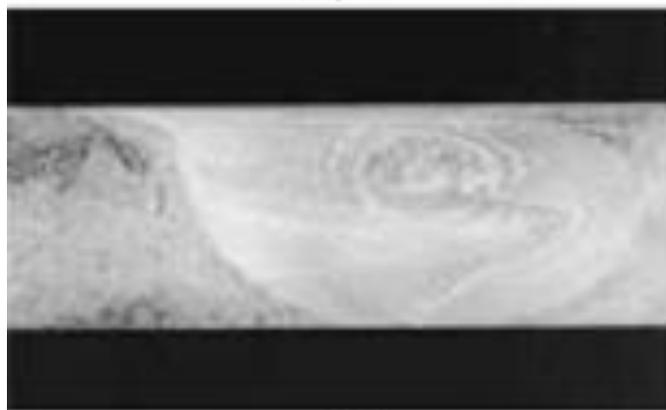
** WC – карбид вольфрама

Материал	Толщина пластины (мм)	Скорость вращения (об/мин)	Скорость продольной подачи (мм)	Размер зерен
7075 Al-T6	6.35	...	127	2-4
6061 Al-T6	6.3	300-1000	90-150	10
Al-Li-Cu	7.6	...	...	16
7075 Al-T651	6.35	350,400	102,152	3.8,7.5
6063 Al-T4,T5	4	360	800-2450	5.9-17.8
6013 Al-T4,T6	4	1400	400-450	10-15
1100 Al	6	400	60	4
5054 Al	6	...	...	6
1080 Al-O	4	...	...	20
5083 Al-O	6	...	...	4
2017 Al-T6	3	1250	60	9-10
2095 Al	1.6	1000	126-252	1.6
Al-Cu-Mg-Ag-T6	4	850	75	5
2024 Al-T351	6	...	80	2-3
7010 Al-T7651	6.35	180,450	95	1.7,6
7050 Al-T651	6.35	350	15	1-4
Al-4Mg-1Zr	10	350	102	1.5
2024 Al	6.35	200-300	25.4	2.0-3.9
7475 Al	6.35	...	...	2.2
5083 Al	6.35	400	25.4	6.0
2519 Al-T87	25.4	275	102	2-12

- При ПСТ достигается высокое качество сварки (рис. 4). Деформация и перемешивание металла в твердой фазе иногда создает микроструктуры более прочные, чем основной материал.
- Обычно, прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90% от этих характеристик для основного материала.
- Сварка может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу вверх и т.д.), поскольку силы гравитации, в данном случае, не играют никакой роли.
- Перемещение инструмента или детали может производиться в различных направлениях и по программе. По мнению западных специалистов, этот процесс является революционным в области сварки листовых материалов.



а)



б)



в)

Рис. 4. Макроструктуры швов полученных сваркой плавлением (а), ПСТ (б) и двухсторонняя сварка (в)

Основные параметры режима ПСТ

- - скорость вращения инструмента;
- - характер вращения инструмента (вращательный, возвратно-вращательный, направление и скорости вращения наружных и внутренних частей инструмента);
- - скорость сварки;
- - конструкция, форма и геометрические характеристики рабочей части инструмента;
- - угол наклона инструмента к поверхности детали

При ПСТ формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон:

«ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала перенесенного выступом инструмента, зону термопластической деформации и зону термического влияния

При традиционной схеме ПСТ наблюдается асимметричная структура «ядра» связанная с однонаправленным перемещением материала

(рис. 5 , а).

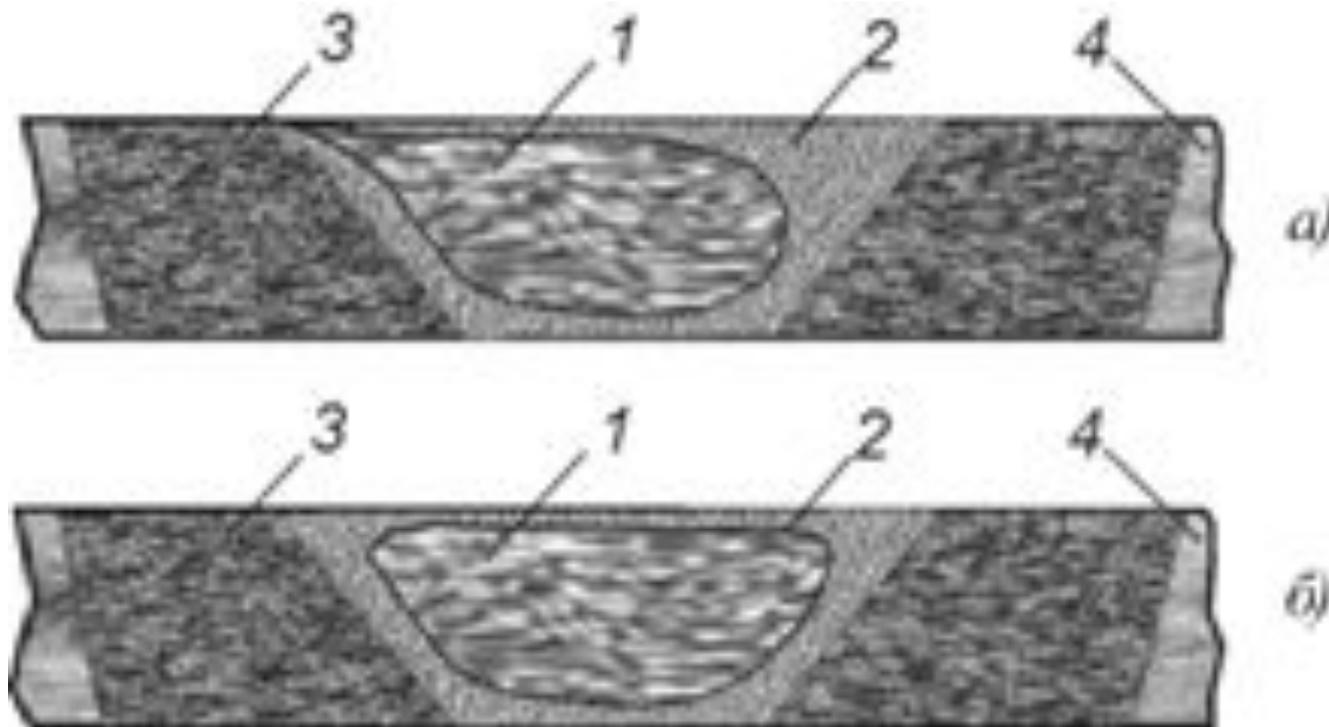


Рис. 5. Структура швов, получаемых при ПСТ с однонаправленным вращением инструмента (а) и возвратно-вращательным (б):

- 1 – «ядро» сварки, перенесенный инструментом термопластически деформированный материал;
- 2 – зона термопластической деформации;
- 3 – зона термического влияния;
- 4 – исходный материал



Схема зон стыков соединения, выполненного СТП: А - основной металл, В - зона термического влияния; С - зона термомеханического воздействия; D - зона динамической рекристаллизации.

- По мнению большинства исследователей основным специфическим дефектом соединений, выполненных СТП, является несплавка в корне шва, ее называют "kissing bonds". Основными причинами возникновения этого дефекта является или локальное увеличение толщины свариваемого или нарушения переноса металла в корневую часть соединения. Как правило, этот дефект имеет очень малый размер по толщине, поэтому обнаружить его с помощью рентгеновского контроля очень трудно.

Для того, чтобы избежать такой асимметрии сварку выполняют с возвратно-вращательным движением инструмента (рис. 6). В этом случае реверс производится через один или несколько, например, пять оборотов инструмента.

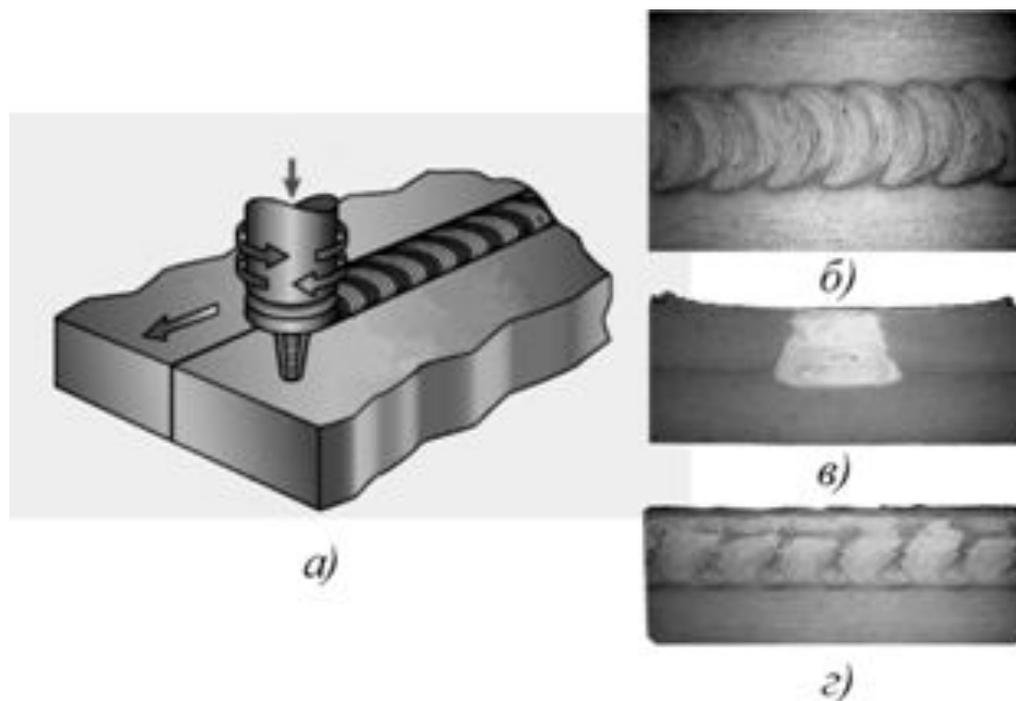


Рис. 6. ПСТ с возвратно-вращательным движением инструмента:
а – схема сварки; б – вид сварного шва;
в – сечение перпендикулярное направлению шва; г – сечение вдоль шва

- Для управления структурой шва могут использоваться специальные инструменты имеющие наружную и внутреннюю части (рис. 7). Вращение этих частей может выполняться с различными скоростями в одном или противоположных направлениях. Наружная часть может выполняться, например, из материала свариваемых деталей. В этом случае в процессе сварки она играет роль присадочного материала, переносимого на поверхность свариваемого изделия.

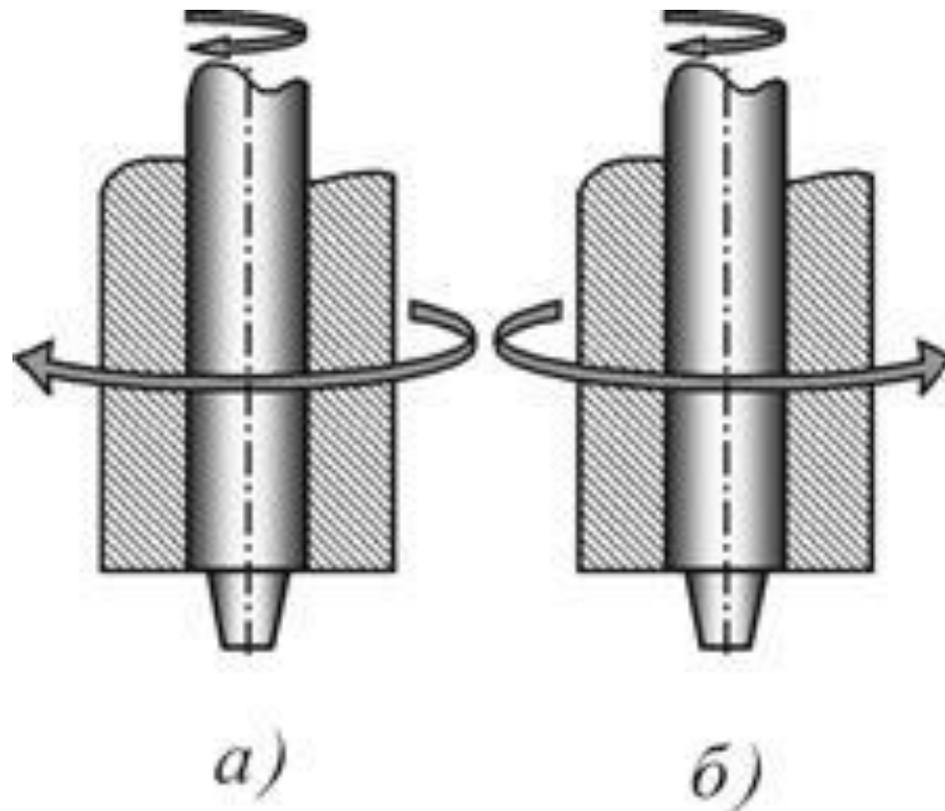
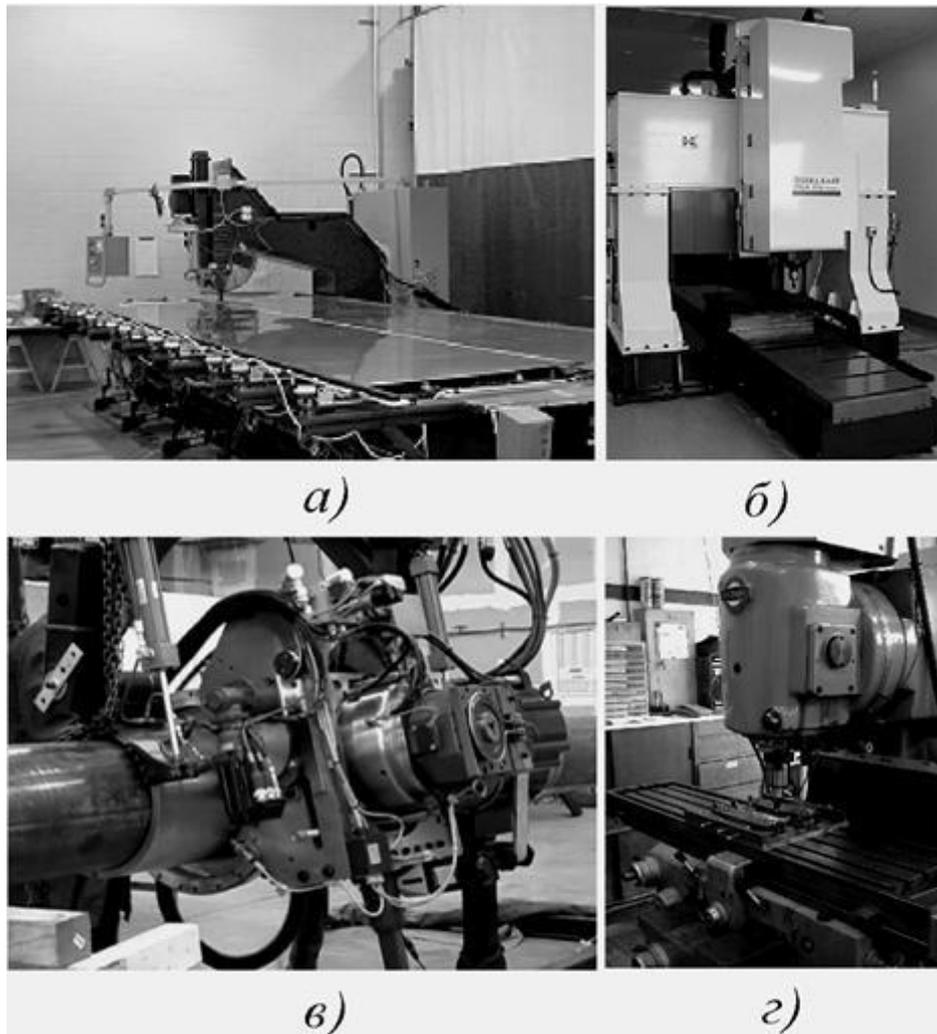


Рис. 7. Инструменты с наружной и внутренней частями, вращающимися в одном (а) и противоположных (б) направлениях

В последние годы для ПСТ разработаны установки различных типоразмеров и компоновки, позволяющие сваривать как листовый материал, так и пространственные конструкции, цилиндрические детали и трубы (рис. 8). ПСТ могут быть, в частности получены сварные соединения, показанные на рис. 9.



- Рис. 8. Оборудование для перемешивающей сварки трением: а – консольного типа; б – портального типа; в – устройство для сварки труб; г – установка на базе модернизированного фрезерного станка

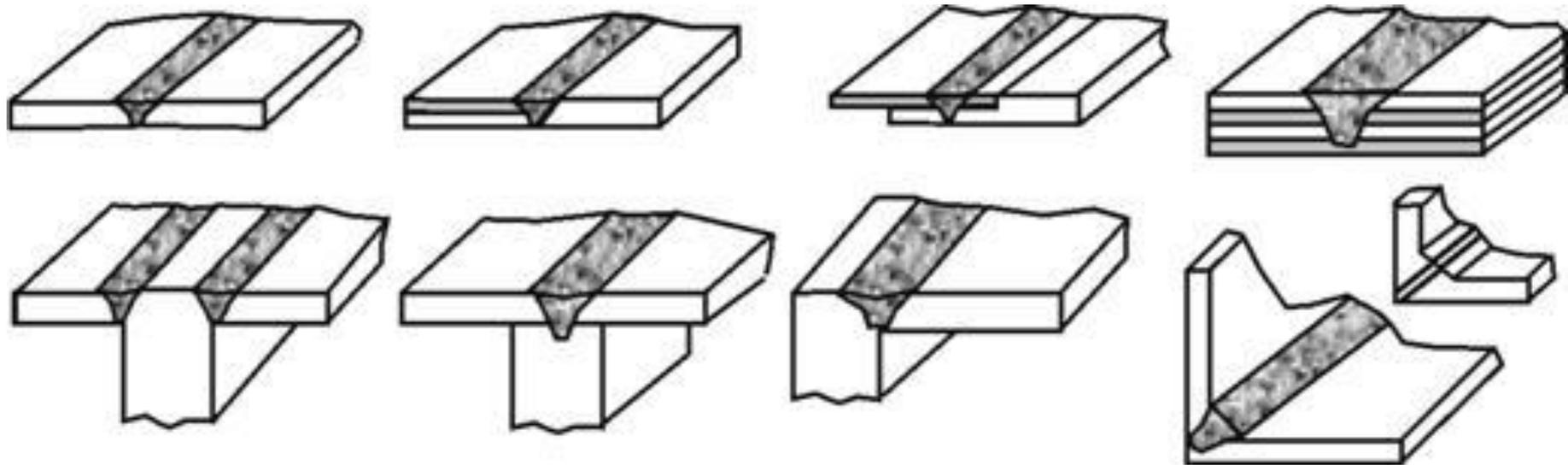
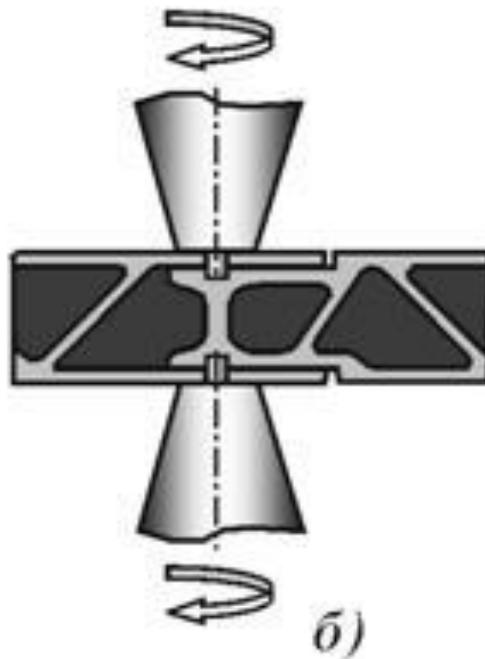


Рис. 9. Технологические возможности сварки методом ЛСТ

Примеры некоторых деталей сваренных ПСТ



а)



б)



в)



г)

Рис. 10.
Изделия,
сваренные ПСТ:
а – панель;
б – схема
двухсторонней
сварки панели;
в – деталь
в виде оболочки;
г – труба
(показана вставка,
обеспечивающая

Основные факторы, ограничивающие применение ПСТ

- - необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей;
- - возникновение отверстий в начале и конце шва;
- - необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов;
- - невозможность формирования швов требующих нанесения дополнительного металла;
- - невозможность сварки материалов имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

- Некоторые из этих ограничений могут быть устранены использованием специальных приемов сварки. Например, образующееся при сварке кольцевого шва отверстие может быть выведено за пределы шва использованием специальной клиновидной вставки (рис. 11). В дальнейшем эта вставка удаляется механической обработкой.

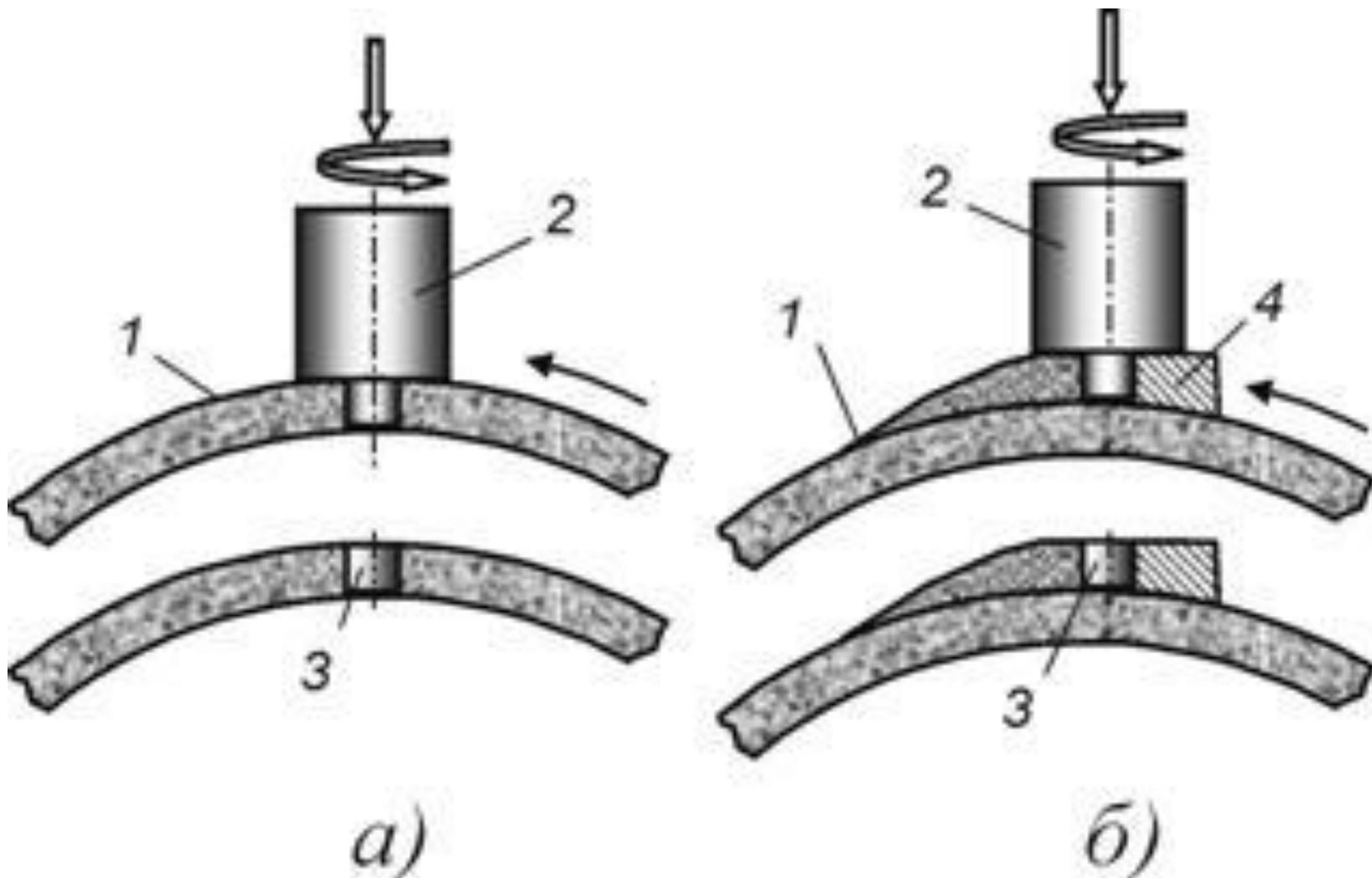
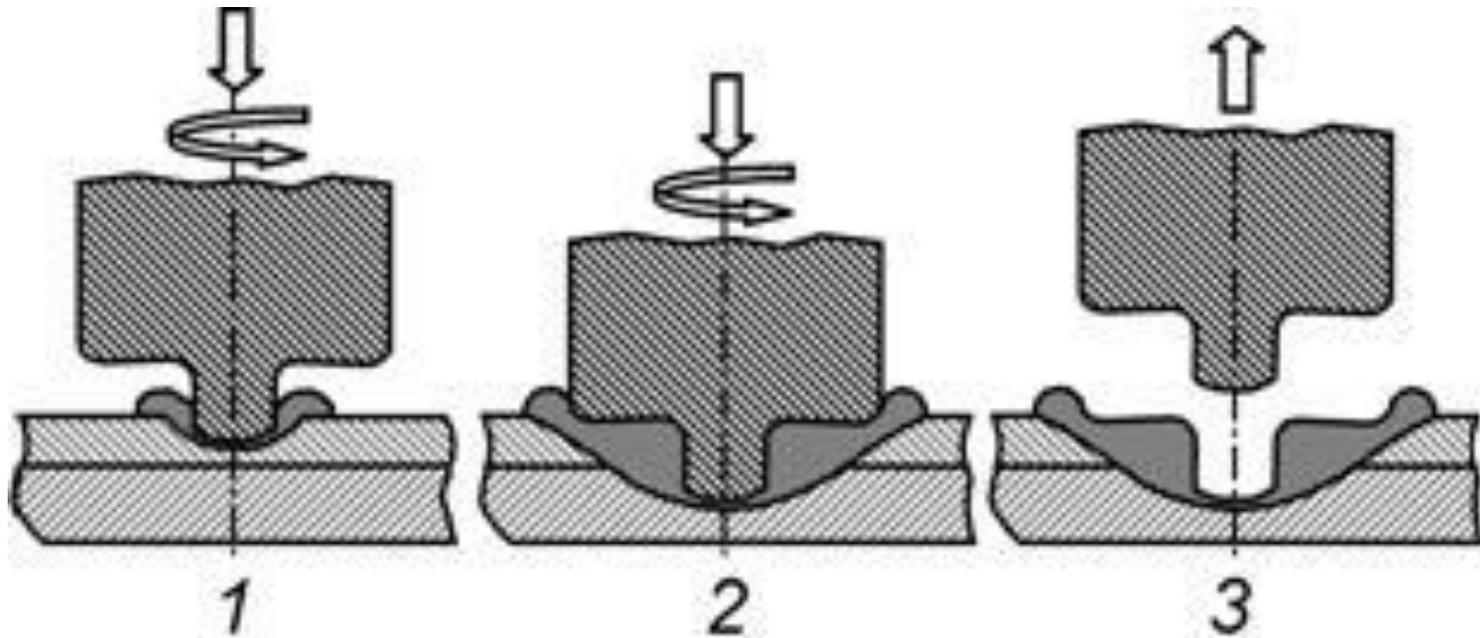


Рис. 11. I Получение кольцевого шва без использования клиновидной вставки (а) и с вставкой (б): 1 – кольцевой шов; 2 – инструмент; 3 – отверстие остающееся после отвода инструмента; 4 – клиновидная вставка

- Одной из разновидностей ПСТ является точечная сварка трением (рис. 12, 13). В частности, она получила применение для сварки алюминия взамен дуговой и контактной точечной сварки, при применении которых существуют технологические трудности, обусловленные высокой электро- и теплопроводностью алюминия.

Рис. 12. Стадии формирования сварного соединения при точечной сварке трением



- Сварка трением, в отличие от контактной точечной сварки, не требует использования охлаждающей эмульсии и сжатого воздуха. Резко снижается энергопотребление. Капиталовложения в оборудование для сварки трением на 40% ниже, чем на оборудование для контактной сварки. При ее выполнении не требуется предварительной очистки рабочих поверхностей, отсутствует разбрызгивание расплавленного металла.

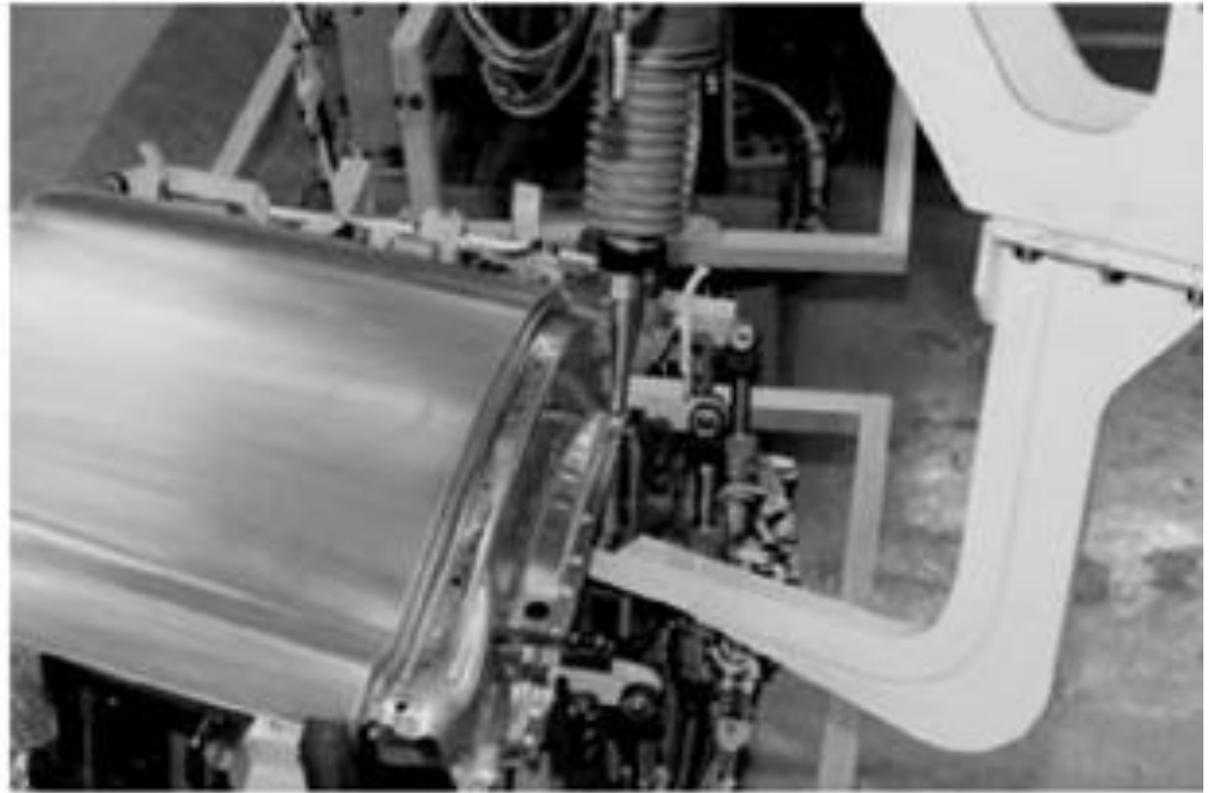
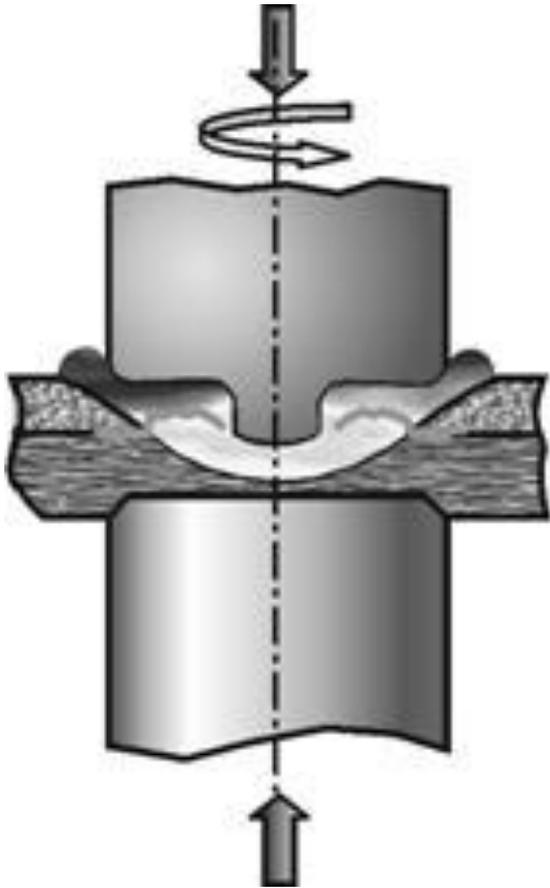


Рис. 13. Схема точечной сварки трением, используемая фирмой MAZDA, и устройство для ее выполнения

- Работы по перемешивающей и другим технологиям сварки трением выполняются и курируются The Welding Institute in UK (TWI) (Великобритания), NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory MTS Systems Corporation, Thompson Friction Welding (США), Imhof Hartchrom GmbH и Klaus Raiser GmbH (Германия), Hidetoshi Fujii и исследовательским центром JWRI при Osaka University (Япония), Shanghai puda friction welder co., ltd. (Китай) и другими корпорациями и компаниями.
- Специализированное оборудование для перемешивающей сварки трением выпускается фирмами Nova-tech Engineering (Рис. 14), Hitachi, Osaka Cast и др.

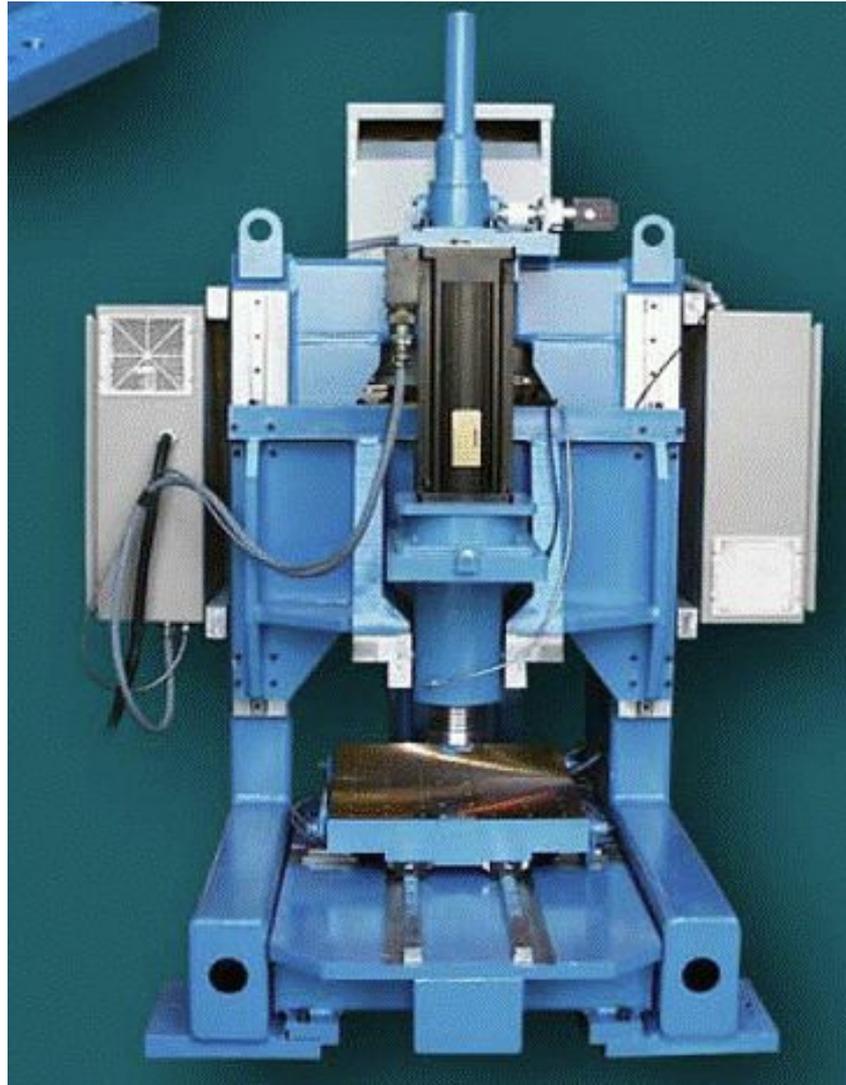


Рис. 14. Станок фирмы Nova-tech engineering inc.



Образцы сплава АМГ6 толщиной 4 мм сваренные
перемешивающей сваркой трением.
Слева с лицевой стороны, справа с изнаночной



Образцы из листового материала толщиной 1 мм из
алюминиевого сплава АД1 (слева) и ст 20 (справа)



Образцы из титанового сплава ВТ20 (слева) и никелевого сплава ХТ77ТЮР толщиной 1,5 мм, сваренные точечной сваркой трением



Образец из алюминиевого сплава АМГ6 толщиной 1,2 мм, сваренный точечной сваркой трением



- Рис. 19. Стальной лист (ст. 20) изогнутый по шву



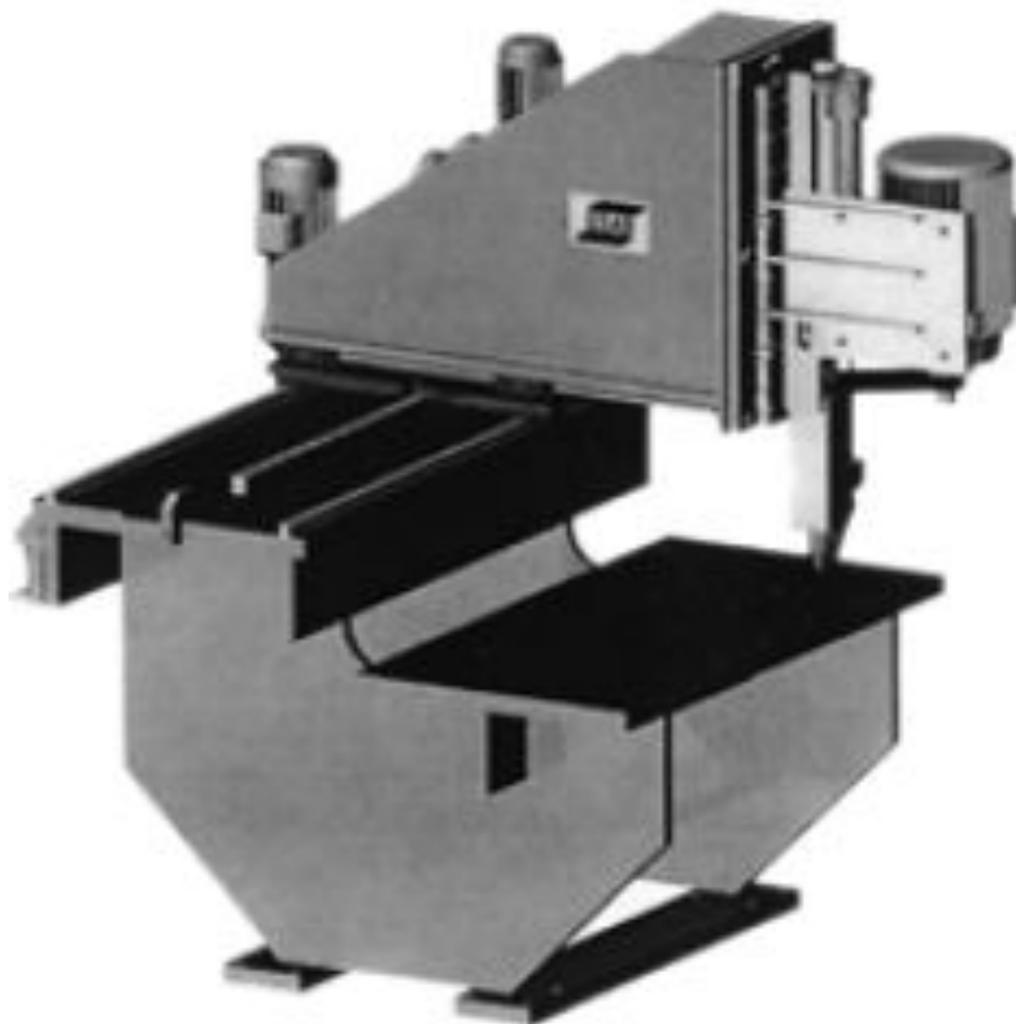
- Рис. 20. Стальной лист (ст. 20) изогнутые поперек шва



- Рис. 21. Сваренный и изогнутый стальной лист

- преимущества сварки трением с перемешиванием по сравнению с другими процессами сварки по показателям статической и усталостной прочности соединения, коррозионной стойкости, уровню сварочной деформации, трудоемкости, энергоемкости, экологической безопасности неоспоримы.

Оборудование для перемешивающей сварки трением



- Передовой производитель сварочного оборудования — концерн ESAB — включил в свою производственную программу установки для перемешивающей сварки трением. Программа Super Stir™ содержит несколько установок, разработанных на базе стандартной установки, на которой можно сваривать изделия размером от 0,5 x 1,5 до 10 x 20 м. Разные модели этих установок имеют консольную или порталную конструкцию. Установки полностью автоматизированные, с одинаковым принципом действия, смонтированы на мощной раме, рассчитанной на большие нагрузки. Сварочные головки перемещаются по сверхпрочной станине от системы реечного привода. Концерн ESAB совместно с исследовательским центром разработал серию установок, которые применяются в космической, авиастроительной, судостроительной, автомобилестроительной, энергетической и других отраслях промышленности.

- На ранней стадии освоения процесса перемешивающей сварки трением (в 90-х гг.) практически только фирма ESAB производила специализированные установки для этого процесса и поставляла их по всему миру. Установки были поставлены и введены в действие на фирме SAPA (Швеция, Финляндия) для сварки из прессовок крупногабаритных полых панелей размером 14,5 x 3 м для судостроения (корпуса судов, морские платформы, высокоскоростные паромы, палубные надстройки судов и т. п.). Одна из первых установок была поставлена на фирму Marine Aluminium (Норвегия), на которой панели из прессованных профилей упрочняют сваркой трением с перемешиванием до размера 14,6 x 6 м для судостроения и железнодорожного подвижного состава. Ежегодно фирма SAPA прессует на 22 прессах и упрочняет перемешивающей сваркой трением на установке Super Stir™ около 180 000 т панелей размером 14,5 x 3,0 м, тогда как на самом мощном прессе P-5 можно получить панель шириной 400 мм. Фирма BOEING приобрела установки для перемешивающей сварки трением продольных (длиной до 15,3 м) и кольцевых (диаметром до 6 м) швов топливных баков ракет серии "Delta" на четырех производственных предприятиях в разных штатах США.

Промышленное применение ПСТ

- Первым изделием, в производстве которого использовали перемешивающую сварку трением, были сотовые панели холодильной установки для быстрого замораживания рыбы на рыболовецких судах. Для большей эффективности производственной линии непосредственно в нее встроены пресс мощностью 65 МН и оборудование для ПСТ. Сварка производится одновременно с двух сторон. Холодильная установка содержит 17 панелей длиной 16 м и толщиной 30 мм. Процесс наблюдается дистанционно посредством видеокамер, и параметры его контролируются автоматически системой мониторинга.

Баки ракеты, сваренные сваркой трением с перемешиванием.



- Фирма BOEING (США) также находится среди первых компаний, реализующих преимущества процесса перемешивающей сварки трением. Фирма уже несколько лет использует ПСТ для изготовления ракет серии Delta [65]. Переход с аргодуговой сварки на перемешивающую сварку трением при изготовлении топливных баков ракет (рис. 29) позволил снизить почти в 2 раза стоимость сварки и улучшить качество швов. За первые четыре года было выполнено свыше 2,5 км бездефектных швов перемешивающей сваркой трением панелей из алюминиевого сплава 2014. В настоящее время фирма BOEING производит с применением ПСТ топливные баки ракеты Delta IV диаметром более 5 м.
- Так же фирма BOEING использует процесс ПСТ при изготовлении самолетных конструкций. Криволинейные соединения створок шасси самолета из сплава 7075 сваривают перемешивающей сваркой трением внахлестку [42]. При этом применяется запатентованный силовой привод с адаптивной системой регулирования глубины погружения инструмента по действующему на него усилию.

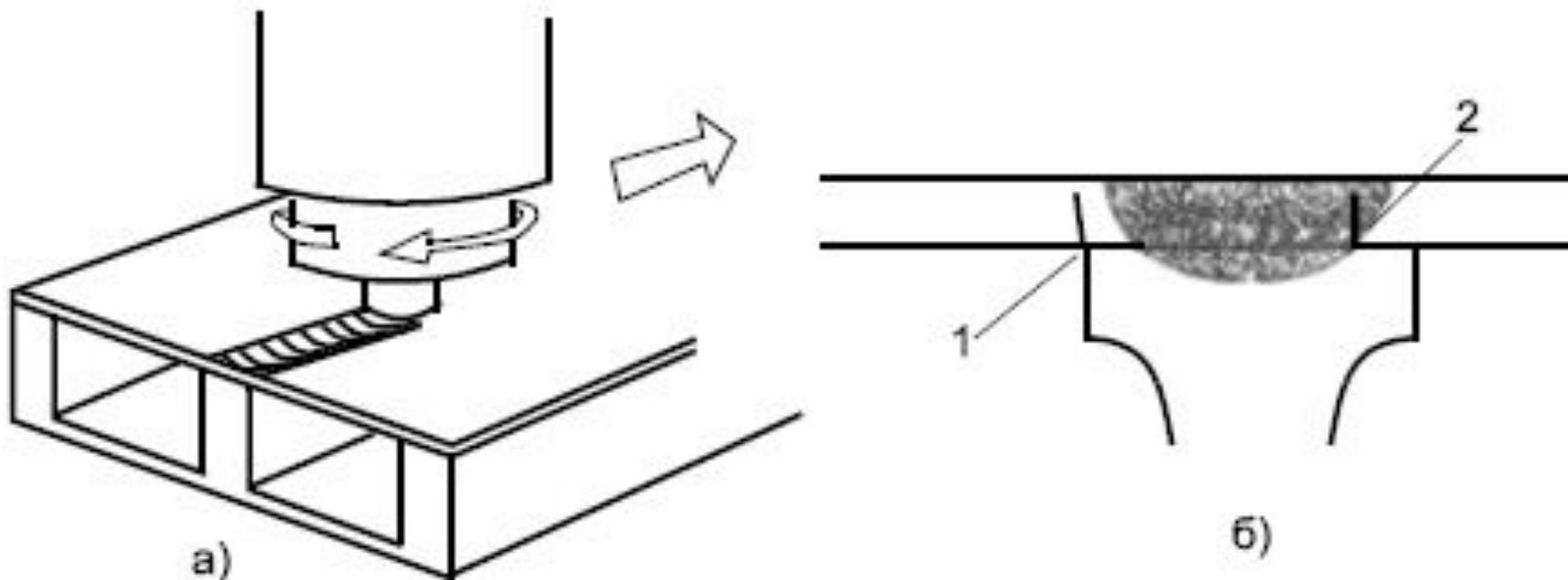
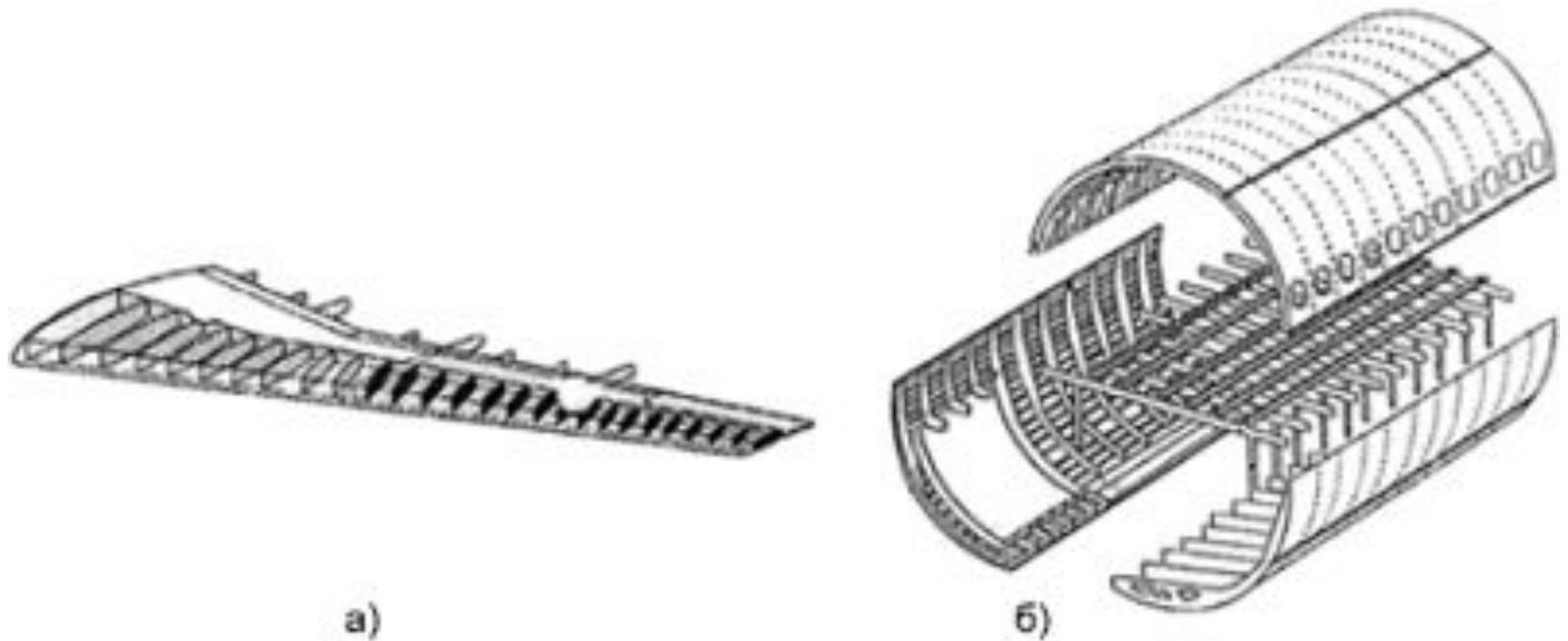


Схема сварки трением с перемешиванием
коробки руля обтекателя (а)
и контур шва в поперечном сечении
таврового соединения (б)





Элементы крыла (а) и панели фюзеляжа (б) самолета AIRBUS 380, соединяемые ПСТ (Европейский проект TANGO — технологии и применение в авиастроении)

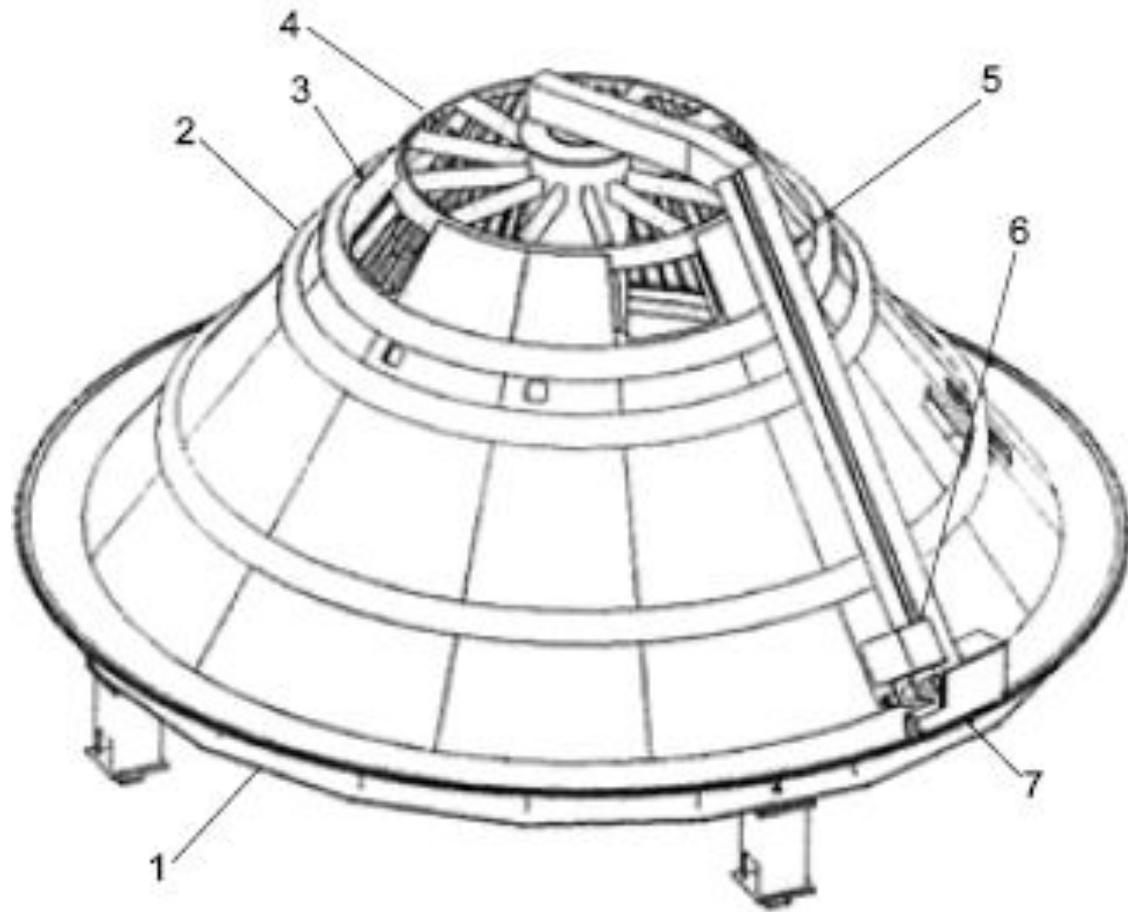
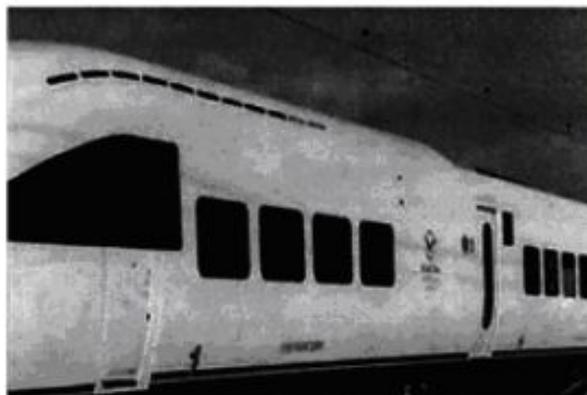
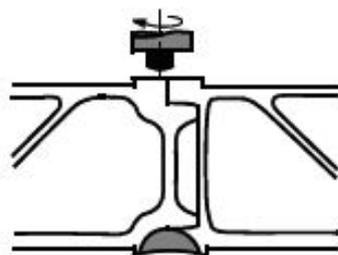
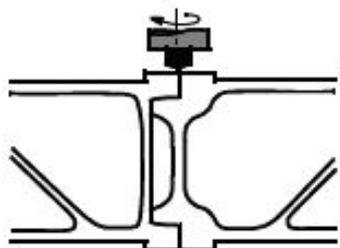
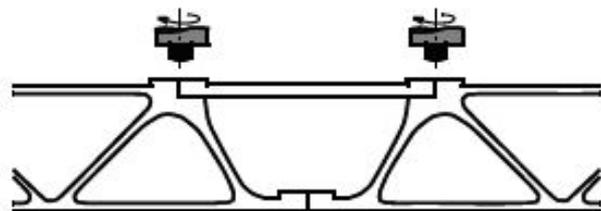


Схема кондуктора для сборки под ПСТ носовой части корпуса двигателя "Ariane 5": 1 — нижняя опора; 2 — кольцевые рамы; 3 — соединяемые панели; 4 — верхняя опора; 5 — опорная балка для ПСТ; 6, 7 — тележки для осевого и радиального перемещения при ПСТ



Стыки полых панелей вагонов двух серий (НИТАСНИ)

- Успешно применяется перемешивающая сварка трением в производстве подвижного состава железнодорожного транспорта. Современные вагоны в последнее время все чаще выполняют из алюминиевых экструдированных профилей и интегрированных жестких панелей. Большого успеха в освоении перемешивающей сварки трением алюминиевых конструкций подвижного состава железных дорог достигло вагоностроение в Японии. Широко применяют крупногабаритные полые панели преимущественно из сплава 6N01 (0,7 Mg; 0,6 Si; 0,1 Cu) в связи с его хорошей способностью к прессованию и малой чувствительности к закалке и из сплава 5083 ввиду его высокой прочности. Оребренные панели размером 1300 S 5000 мм, выполненные перемешивающей сваркой трением, используются для пола суперэкспресса Shinkansen. Большие (1800 S 3000 мм), криволинейные с радиусом кривизны 2600 мм сотовые панели, сваренные ПСТ с лицевой и противоположной сторон, используются для стен вагона (рис. 37). Имеются достоверные данные, что при пробеге скоростного экспресса ТЕС 700 Shinkansen 450 тыс. км со скоростью до 285 км/ч разрушения не возникали, снизились вибрация и шум.

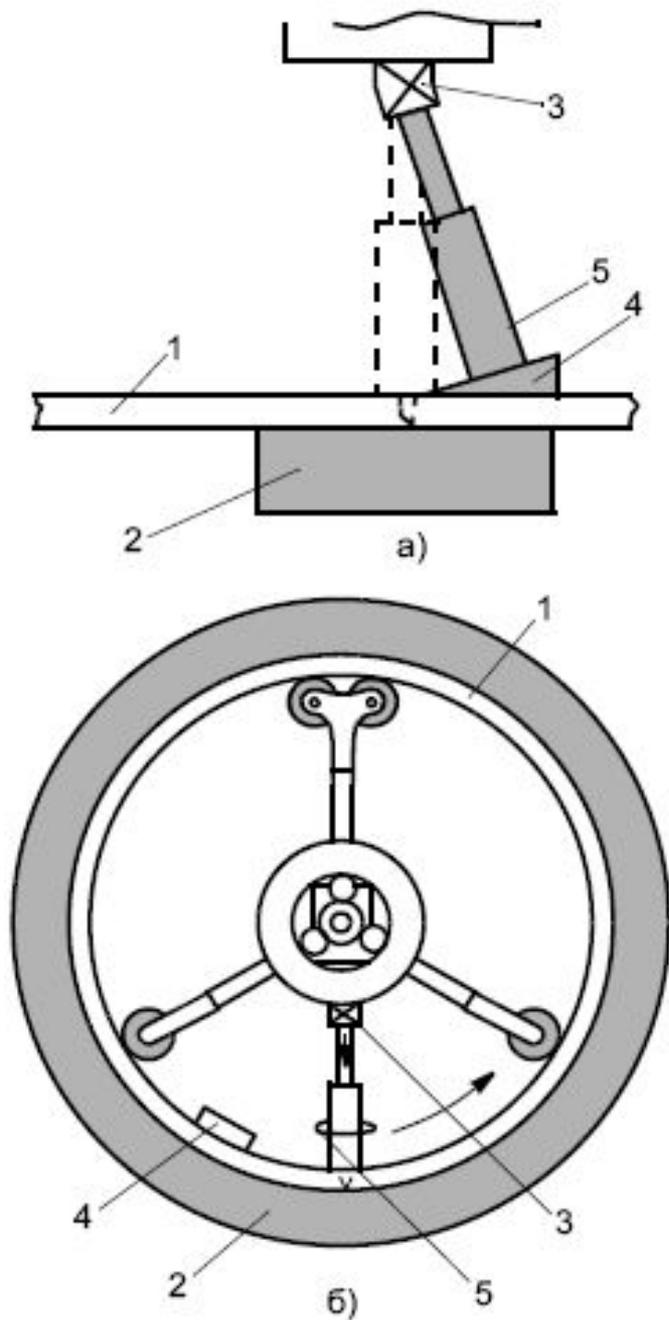
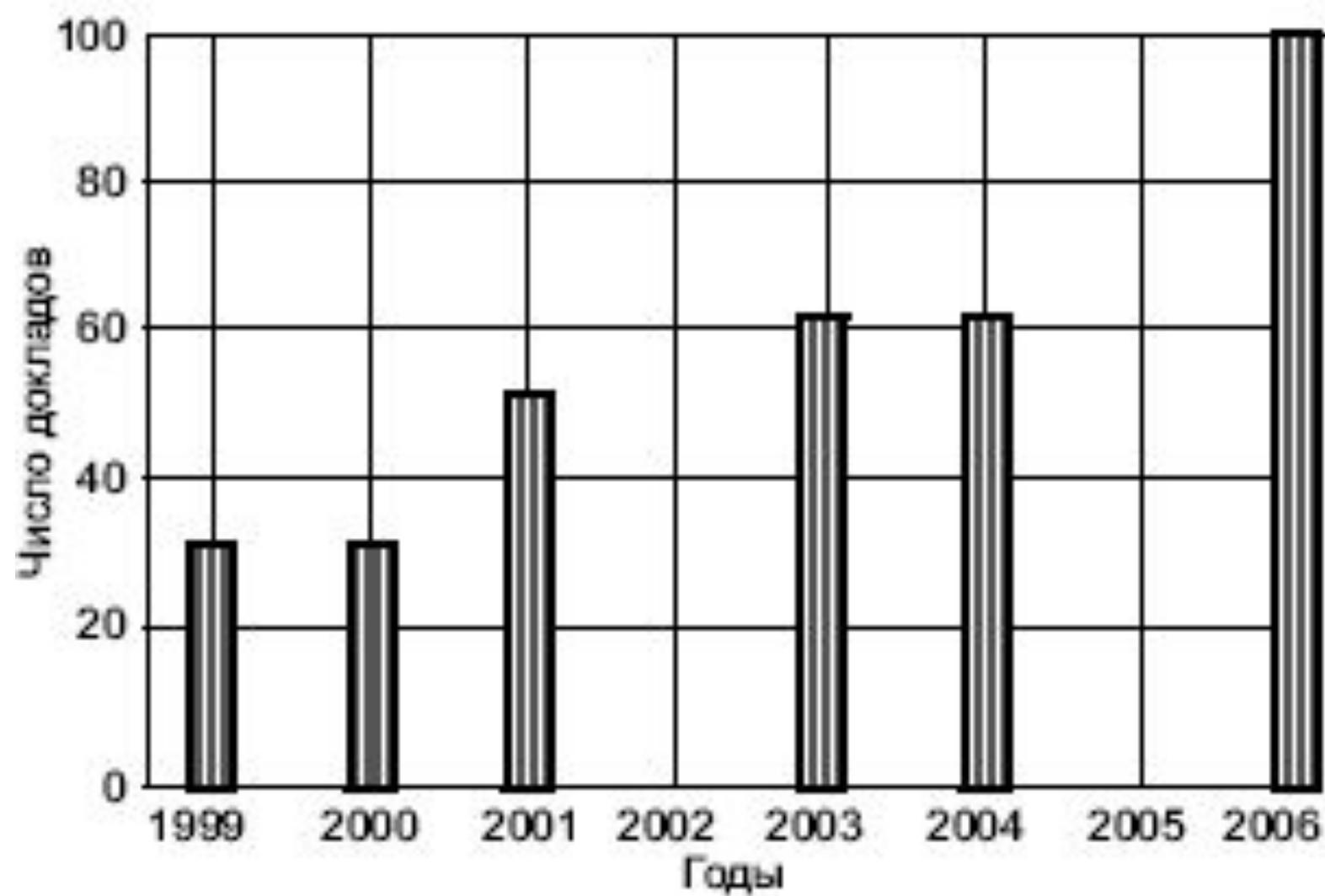


Схема сварки трением с перемешиванием кольцевого соединения трубы: а, б — вид сбоку и вдоль оси трубы; 1 — труба; 2 — опорное кольцо; 3 — шарнирное соединение; 4 — неостающаяся клиновидная пластина для окончания сварки без кратера; 5 — сварочная головка

- Шведской фирмой Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) на установке ESAB AB в 2004—2005 гг. были изготовлены с применением перемешивающей сварки трением надежно герметизированные медные контейнеры с толщиной стенки 50 мм. Контейнеры предназначались для захоронения отработанных радиоактивных отходов в шахтах на глубине 500 м. Срок хранения —100 тыс. лет.
- Метод контроля качества швов, разработанные лабораторией SKB совместно с Университетом (Упсала, Швеция) включают цифровую рентгенографию, УЗК и индукционный метод.

- ПСТ применяется также в строительстве для изготовления жестких крупных панелей стен, фасадов и других компонентов сооружений. Высокая технико-экономическая эффективность использования процесса перемешивающей сварки трением отмечается в мостостроении.
- В 90-х гг. в Швеции была разработана концепция промышленного производства фрагментов моста из высокопрочных алюминиевых сплавов с последующей их доставкой к месту возведения моста и сборкой на месте. Реализация этой технологии стала возможной с появлением перемешивающей сварки трением, которая обеспечила требуемое качество соединений прессовок из высокопрочных алюминиевых сплавов в отличие от сварки плавлением.
- Масса мостового полотна по новой технологии в 10 раз меньше, время возведения (сборки) моста также на порядок меньше, сварная конструкция из сплава 6005 практически не корродирует.
- За последние 10—15 лет в Скандинавии возведены около 100 таких мостов (в основном в Швеции). Перечисленными объектами промышленное применение процесса сварки трением с перемешиванием не ограничивается, отмечены лишь наиболее крупные из них.



- Несмотря на хорошие результаты многочисленных исследований и разработок, для применения перемешивающей сварки трением ответственных конструкций соответствующие департаменты (например, в аэрокосмической отрасли — NASA) требуют разработки стандартов и спецификаций. В настоящее время Международная организация по стандартизации (ISO) разрабатывает совместно с институтами стандарт ISO/AWI — 25239 по перемешивающей сварке трением алюминия и алюминиевых сплавов (основные требования). Стандарт включает пять частей: общие положения; содержание; проектирование сварных соединений; квалификация операторов по сварке; техническое описание и ограничения в процедуре сварки; качество и требования по контролю.