

Уважаемые студенты!

Задание:

1. Прочтите приведенный ниже конспект лекции.
2. Напишите конспект лекции в тетрадь объемом не менее 5 страниц рукописного текста.
3. Ответьте письменно на контрольные вопросы.
4. Письменный отчет конспекта лекции и ответов на вопросы в виде фото предоставьте преподавателю на e-mail (tamara_grechko@mail.ru).

Обратите внимание!!! В случае возникновения вопросов по теоретическому материалу лекции обращайтесь для консультации к преподавателю по тел. 0721355729 (Ватсап).

С уважением, Гречко Тамара Ивановна!

Лекция

Тема: Сущность и основные параметры сварки трением

Цель: Изучить особенности сварки трением

План

1. Сущность и основные параметры сварки трением
2. Разновидности сварки трением
3. Сварка трением с перемешиванием конструкционных материалов
4. Перспективы развития сварки трением

1. Сущность и основные параметры сварки трением

Сварка трением относится к процессам, в которых используется давление, кратковременный нагрев и взаимное перемещение свариваемых поверхностей.

Сварка трением происходит в твердом состоянии при взаимном скольжении двух твердых тел, сжатых силой P . Работа, совершаемая силами трения при скольжении, превращается в теплоту, что приводит к интенсивному нагреву трущихся поверхностей.

Трение поверхностей осуществляется вращением или возвратно-поступательным перемещением свариваемых заготовок, сжимаемых силой P . В результате нагрева и сжатия возникает совместная пластическая деформация. Сварное соединение образуется в результате возникновения металлических связей между чистыми контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Окисные пленки, имеющиеся в месте соединения, разрушаются в результате трения и удаляются за счет пластической деформации в радиальных направлениях.

Сварка трением осуществляется за счет тепла, выделяющегося при взаимном трении поверхностей свариваемых деталей. При сварке трением одна

из деталей вращается вокруг своей оси со скоростью около 3000 об/мин, а вторая деталь прижимается к ней осевым давлением. Благодаря трению свариваемые торцы обеих деталей нагреваются на некоторую глубину в течение 4-5 с до сварочного состояния и под действием осевого давления подвергаются пластической деформации. После остановки вращения дополнительное сжатие обеспечивает хорошую сварку деталей. Количество тепла, выделяющегося при трении, зависит от коэффициента трения, осевого давления и скорости взаимного перемещения деталей.

Сварка трением не требует специальной подготовки кромок свариваемых изделий. Необходимыми условиями являются строгое совмещение осей деталей и перпендикулярность свариваемых плоскостей к оси вращения.

Принципиальные схемы сварки трением:

- а) вращение основной детали;
- б) вращение обеих деталей;
- в) неподвижных деталей с вращающейся вставкой;
- г) при возвратно-поступательном движении одной детали

Основными параметрами сварки трением являются:

- скорость относительного перемещения свариваемых поверхностей,
- продолжительность нагрева, удельное давление, прилагаемое к свариваемым поверхностям,
- пластическая деформация, т.е. осадка.

Параметры режима сварки трением зависят от свойств свариваемого металла, площади сечения и конфигурации изделия. Сваркой трением соединяют однородные и разнородные металлы и сплавы с различными свойствами, например, медь со сталью, медь с алюминием, алюминий с титаном и др. При сварке снижаются затраты энергии и требуемые мощности. Так, например, при сварке стали трением энергии расходуется в 5-10 раз меньше, чем при контактной сварке.

Для сварки трением выпускают специальное оборудование (типа МСТ-23, МСТ-35 и МСТ-41 мощностью 10, 20 и 40 кВт), обеспечивающее работу при достаточно больших скоростях вращения и осевых усилиях и позволяющее производить быстрый запуск и мгновенную остановку шпинделя машины. В виде исключения после соответствующей реконструкции используют обычные металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные).

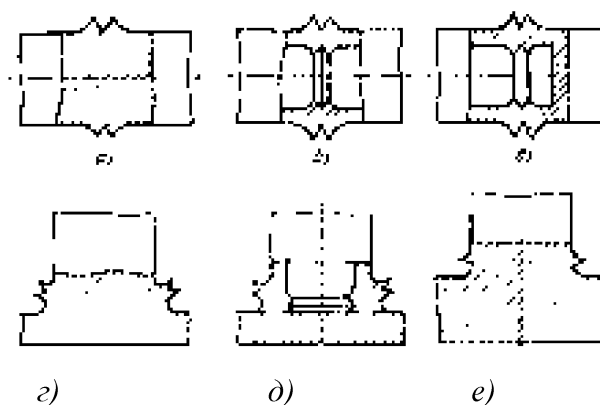


Рисунок 27.1 - Типы сварных соединений сварки трением:

a — стержней встык; *b* — труб встык; *c* — встык стержня с трубой;
г — стержня с листом; *д* — трубы с листом; *e* — стержня с массивной деталью

2. Разновидности сварки трением

1. Инерционная сварка отличается от обычного способа сварки трением лишь тем, что потребляемая из электрической сети энергия, преобразованная электродвигателем в механическую энергию, поступает к месту сварки не непосредственно, а предварительно (в промежутках между сварками) аккумулируется в маховике машины. Эта особенность процесса позволила своеобразно решить некоторые вопросы технологии и конструкцию оборудования.

Процесс инерционной сварки заранее закрепленных в зажимах подлежащих сварке заготовок начинается с того, что маховик машины с помощью электродвигателя приводится во вращение. По мере нарастания угловой скорости маховика в нем нарастает запас кинетической энергии \mathcal{E}_k , величина которого определяется из уравнения

$$\mathcal{E}_k = \frac{J\omega^2}{2},$$

Когда накопленная энергия достигнет заданной величины \mathcal{E}_{\max} , необходимой и достаточной для сварки деталей, а угловая скорость достигнет соответственной величины, специальное устройство, реагирующее на величину угловой скорости, сработает и пошлет сигнал на механизм, подключающий шпиндель машины к вращающемуся маховику и отключающий маховик от приводного двигателя.

Одна из свариваемых деталей при этом приводится во вращение; если детали предварительно были прижаты осевым усилием одна к другой, то в стыке начинается процесс тепловыделения. Момент сил трения M_T в стыке

является единственным (если не считать потерь на трение в узлах машины) тормозным моментом в системе, и, следовательно, им определяется тормозная путь («выбег») и длительность торможения (сварки) $t_{св}$.

Таким образом, режим сварки данных деталей при уже выбранном для них маховике однозначно определяется лишь двумя параметрами процесса— начальной угловой скоростью маховика ω_{max} и усилием P (удельным давлением) сжатия деталей.

Как видно из рисунка 27.2, время нагрева при инерционной сварке в несколько раз меньше, чем при обычной сварке трением. Кратковременный цикл нагрева-охлаждения позволяет с помощью инерционной сварки соединять такие разнородные материалы, как титан с алюминием и другие сочетания, в то время как при обычной сварке трением это в ряде случаев невыполнимо.

Отрицательной особенностью машин для инерционной сварки следует считать ведение процесса на повышенных угловых скоростях при больших осевых усилиях, что требует применения тяжелых подшипниковых узлов и зажимов, выдерживающих большие радиальные усилия. В результате машины для инерционной сварки сложнее, тяжелее и дороже машин для обычной сварки трением, а так как они не отличаются существенно повышенной производительностью, целесообразность их использования ограничивается теми случаями, когда соединяют материалы в сочетаниях, не сваривающихся обычным способом сварки трением (алюминий—титан и др.)

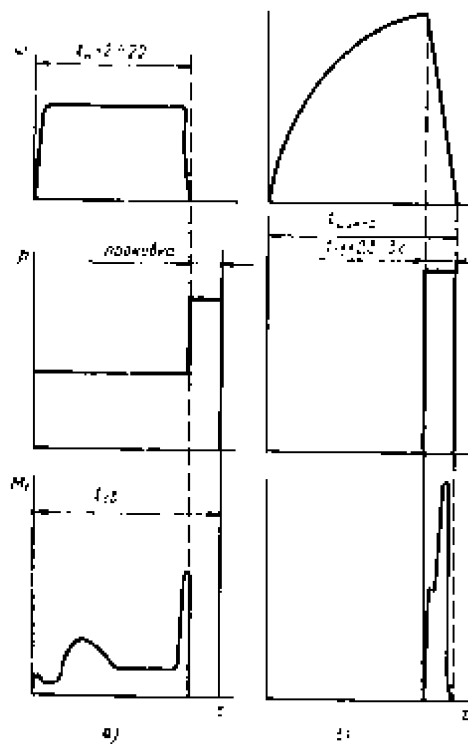


Рисунок 27.2 – Циклограммы процесса сварки трением:

а – обычной; б - инерционной

2. Орбитальная сварка является разновидностью сварки трением и отличается тем, что она позволяет осуществлять соединение не только круглых заготовок, но также и заготовок любой произвольной формы сечения. Это достигается путем вращения обеих свариваемых заготовок с одинаковой угловой скоростью в одну и ту же сторону (синхронно и синфазно). При этом, даже если торцы заготовок и были прижаты один к другому, силы трения между ними возникнуть не могут, до тех пор, пока оси вращения обеих заготовок совпадают. Достаточно одну из них сместить параллельно самой себе на некоторую величину, как тотчас же в стыке возникнет трение, начнется тепловыделение.

Эта схема процесса (рисунок 27.3) отличается от других разновидностей сварки трением тем, что каждая точка на торце одной из свариваемых заготовок описывает окружности относительно соответствующей точки на торце второй заготовки с угловой скоростью, равной угловой скорости заготовок. Следовательно, мощность тепловыделения на всей поверхности трения постоянна и определяется, как обычно, величиной удельного давления, а ее численные значения должны лежать в пределах, обычных для сварки трением — от 0,5 до 2 м/с (для черных металлов и алюминия). Процесс тепловыделения завершается в результате принудительного совмещения осей все еще вращающихся заготовок; в то же время к свариваемым заготовкам прикладывается проковочное давление, и их совместное вращение прекращается; к моменту полной остановки деталь оказывается сваренной.

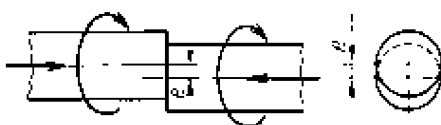


Рисунок 27.3 - Схема процесса орбитальной сварки

Кроме названной особенности — возможности сварки деталей некруглого сечения, орбитальная сварка обладает другим важным преимуществом — повышенной производительностью.

При орбитальной сварке нет необходимости оси свариваемых деталей совмещать с осью вращения, Орбитальной сваркой благодаря синхронности вращения заготовок можно соединять такие заготовки, которые после сварки должны быть строго сориентированы по углу поворота.

Процесс орбитальной сварки пока еще не нашел промышленного применения, что, вероятно, объясняется недостаточной популяризацией возможностей орбитальной сварки.

3. Сварка двух деталей с помощью третьего тела Соединение длинных (или коротких, но массивных) деталей с помощью сварки трением осложнено тем, что приведение во вращение и быстрое торможение таких деталей сопряжено со значительными трудностями. В этом случае применяется сварка двух неподвижных деталей с помощью вращения зажато между ними третьего тела. В качестве такого третьего тела может быть использован тонкий диск с диаметром большим, чем диаметр свариваемых заготовок (рисунок 27.4,а), для удобства захвата диска зажимом либо (рис. 7.4,б) относительно длинная в осевом размере вставка, диаметр которой может быть таким же, как и диаметр подлежащих соединению заготовок.

4. Одновременная сварка трех заготовок - прием, применяемый с целью, увеличения производительности труда, причем средняя заготовка (рис. 27.4, в) в процессе сварки остается неподвижной, а обе крайние приводятся во вращение с помощью двух отдельных шпинделей; вращение крайних заготовок может быть синхронизировано, если требуется взаимная ориентация деталей по углу поворота либо вращение обоих шпинделей осуществляется без применения синхронизаторов.

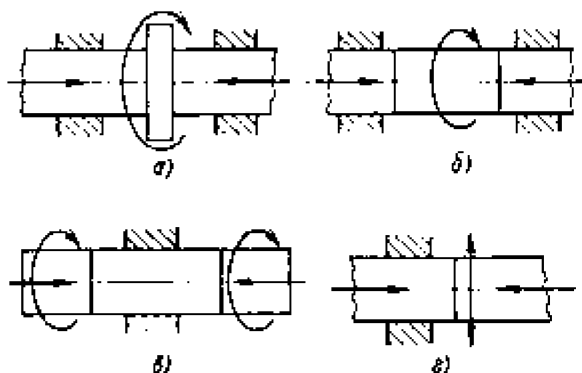


Рисунок 27.4 – Разновидности процесса сварки трением:

а, б – сварка с помощью вращения третьего тела;

в – одновременная сварка двух деталей на машине с двумя шпинделями;

г – вибрационная сварка

5. Вибрационная сварка. Это процесс сварки трением некруглых деталей, при котором вместо относительного вращения используется возвратно-поступательное движение торца одной из свариваемых заготовок относительно другой (рисунок 4, г). Практически эта схема процесса не нашла применения, так как сварочная установка получается очень неэкономичной: большая доля вводимой в машину энергии растрачивается бесполезно на преодоление сил инерции и на износ частей и деталей самой машины; при необходимости соединять трением детали некруглой формы правильнее обращаться к орбитальной сварке.

6. Ротационная сварка трением - процесс сварки в твердой фазе без расплавления металла. Вращающийся инструмент (шпиндель), специально разработанный для РСТ, прижат с усилием к поверхности стыка и перемещается вдоль него, выделяя тепло и деформируя материал, переводя его в сверхпластичное состояние. На рабочем торце инструмента цилиндрической формы имеется выступающая центральная цилиндрическая часть меньшего диаметра. Этот выступ (шип), внедряясь при вращении инструмента в стык, создает вокруг себя тонкий слой металла в сверхпластичном состоянии. Этот слой смыкается за шипом по мере продвижения инструмента вдоль стыка и образует прочное соединение торцов стыка. Между износостойким сварочным инструментом и материалом обрабатываемых деталей возникает тепло от трения. Это тепло заставляет материал размягчаться без достижения температуры плавления и дает возможность инструменту продвигаться вдоль линии сварки.

Термический цикл, создаваемый вращением инструмента при различных скоростях, является фактором управления микроструктурой места стыка и зоной термического влияния. Перепад температур на поверхности стыка и у его корня влияет на процесс деформации сверхпластичного металла. При увеличении частоты вращения твердость по сечению ядра сварной точки более однородна, что влечет увеличение размеров зерен. При очень высокой частоте вращения инструмента ядра сварной точки начинают разрушаться. Для каждого материала и его толщины имеется оптимальное соотношение частоты вращения инструмента и скорости перемещения по стыку.

Оценка качества

Лучшим способом оценки качества РСТ является сравнение ее с другими методами сварки. Деформация очень ограниченного пространства при малом тепловложении и при твердом состоянии материала определяет качество сварки РСТ выше качества других методов сварки.

Область применения РСТ- конструкции, к которым предъявляются высочайшие требования, например ракеты и самолеты. Скорость сварки и высокое качество, получаемое без дополнительной предварительной или последующей обработки шва, способствуют постоянному расширению области применения РСТ.

При сварке *кольцевого шва* с помощью РСТ в конце шва, на месте выхода инструмента, остается отверстие. Это отверстие можно заварить после завершения сварки. Более простым и надежным способом закончить шов является окончание шва на дополнительном блоке материала вне шва. Методы контроля качества сварки включают цифровую рентгенографию,

ультразвуковой и индуктивный метод проверки.

Преимущества ротационной сварки трением:

- Нет ни сварочной проволоки, ни защитного газа. Инструмент не является разовым (один инструмент используется для выполнения более 1000 метров шва в алюминиевых сплавах серии 6000).
- Минимальная подготовка поверхности, обычно требуется только обезжиривание.
- Экономно по энергопотреблению, только 20% затрат тепла по сравнению с процессом сварки металлическим электродом в инертном газе.
- Не выделяется никаких испарений или токсичных газов, опасных для операторов. Операторы и другой персонал не подвергаются воздействию излучения от дуги.
- Поверхность готова к использованию, так как нет необходимости ни удалять брызги, ни выполнять какую-либо подготовку после сварки. Сторона вершины шва является идеальной копией подложки, а верхняя сторона уже имеет отфрезерованную структуру, образованную буртиком.

7. Радиальная сварка трением основана на использовании теплоты трением наружного или внутреннего кольца, вращающегося с заданной угловой скоростью, о скошенные концы труб, прижатых одна к другой с определенной силой (рисунок 27.5).

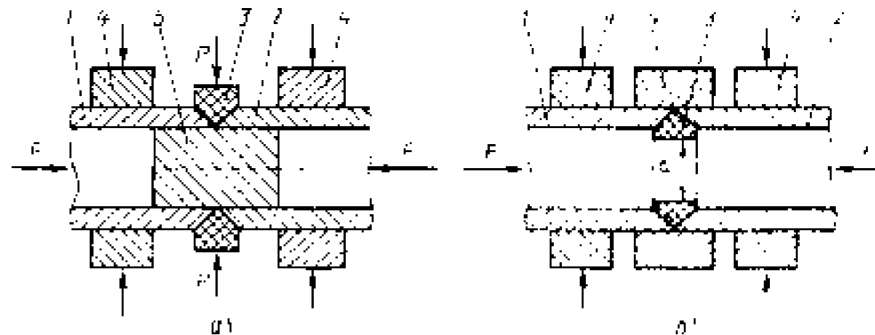


Рисунок 27.5 - Схема радиальной сварки трением:

- а - с наружным разжимным кольцом;
- б - с внутренним разжимным кольцом;
- 1, 2 - свариваемые заготовки;
- 3 - вращающееся кольцо из присадочного материала;
- 4 – зажимные элементы; 5 – оправка.

3. Сварка трением с перемешиванием конструкционных материалов

Этот метод применяется в таких отраслях как вагоно-, судо-, авиастроение и многих других. Сварка трением с перемешиванием относится к процессам соединения материалов в твердой фазе и поэтому лишена

недостатков, связанных с расплавлением и испарением металла.

Сущность процесса заключается в следующем (рисунок 6). Для сварки используют инструмент в форме стержня, состоящий из двух основных частей, а именно: заплечика или бурта (утолщенная часть) и наконечника (выступающая часть). Размеры этих конструктивных элементов выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей.

Длину наконечника устанавливают приблизительно равной толщине детали, подлежащей сварке. Диаметр заплечика может изменяться от 1,2 до 25 мм. Вращающийся с высокой скоростью инструмент в месте стыка вводится в соприкосновение с поверхностью заготовок так, чтобы наконечник внедрился в заготовки на глубину, примерно равную их толщине, а заплечик коснулся их поверхности. После этого инструмент перемещается по линии соединения со скоростью сварки. В результате работы сил трения происходит нагрев металла до пластического состояния, перемешивание его вращающимся инструментом и вытеснение в освобождающееся пространство позади движущегося по линии стыка инструмента. Объем, в котором формируется шов, ограничивается сверху заплечиком инструмента. По окончании сварки вращающийся инструмент выводят из стыка за пределы заготовки.

В связи с асимметрией структуры швов в поперечном сечении сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, принято различать сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону – отхода.

СТП применяют в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых и магниевых сплавов.

Выполнена успешная сварка данным способом медных, никелевых и титановых сплавов, а также сталей. С помощью СТП сваривают алюминиевые сплавы толщиной до 75 мм за один проход. Сварка трением с перемешиванием позволяет получать нахлесточные соединения алюминиевых листов толщиной от 0,2 мм. Скорость сварки сплава 6082 толщиной 5мм может достигать 6 м/мин.

Основными параметрами процесса СТП являются: скорость сварки, частота вращения инструмента, усилия прижатия и перемещения инструмента, угол наклона инструмента, его размеры. Усилия прижатия и перемещения зависят от типа свариваемого материала, его толщины и скорости сварки. Сварка образцов из сплава 7010 – Т7651 толщиной 6,35 мм при изменении скорости сварки в диапазоне от 59 до 159 мм/мин и скорости

вращения инструмента от 180 до 660 об/мин показала, что при увеличении скорости вращения увеличивается тепловложение в металл и в сварном соединении формируется микроструктура с более однородными зернами. При этом также повышаются прочностные и пластические свойства до определенного предела. При увеличении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента для достижения оптимальных условий. Однако для полного отсутствия дефектов, а также для обеспечения всех необходимых свойств, надежности и технологичности необходимо строго выбирать режимы, оптимально подходящие для определенной продукции.

Преимущества сварки трением с перемешиванием:

- в зоне сварки лучше сохраняются свойства основного металла по сравнению со способами сварки плавлением;
- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;
- возможность получения бездефектных швов на сплавах, которые при сварке плавлением склонны к образованию горячих трещин и пористости в швах;
- не требуется использование присадочного материала и защитного газа, удаление поверхностных оксидов на кромках перед сваркой, а также шлака и брызг после сварки;
- отсутствуют потери легирующих элементов металла при его сварке.

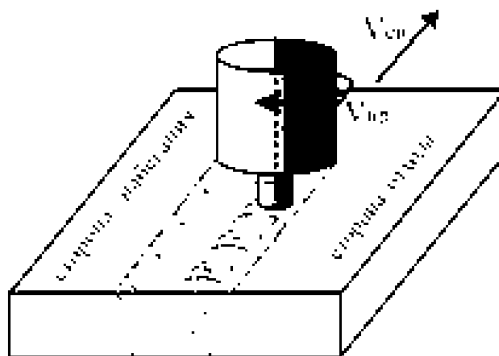


Рисунок 27.6 - Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Макроструктура сварных соединений при сварке трением с перемешиванием характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным способами сварки плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра, которое содержит овальные концентрические кольца, различающиеся структурой. К ядру примыкает сложный профиль, который образует верхнюю часть шва. Образование овальных колец связывается с особенностями перемешивания металла наконечником инструмента. В сварном соединении при СТП выделяют

четыре зоны, которые схематически представлены на рисунке 27.7. Непосредственно к зоне А (основной металл) примыкает зона В, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева (зона термического влияния). Зона С, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву, названа зоной термомеханического влияния (ЗТМВ). Зона D – это ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация. Твердость металла уменьшается в направлении от основного металла к центру шва, и минимальное значение достигается в ЗТВ (рисунок 27.7). Снижение твердости в ЗТВ происходит за счет перестаривания, уменьшения плотности дислокаций либо за счет обоих этих механизмов.

Уровни выделений Cr, Cu, Mn, Cr⁺⁶ при СТП сталей значительно ниже (<0,03, <0,03, <0,02 и <0,01 мг/мм³ соответственно), чем при аргонодуговой сварке (0,25, 0,11, 1,88 и 0,02 мг/мм³ соответственно). Сравнение затрат на производство при использовании сварки трением с перемешиванием и сварки плавящимся электродом (СПЭ) показало, что начальные капиталовложения при СТП более высокие, но с увеличением объемов производства сварка трением с перемешиванием становится экономически выгоднее, чем дуговая сварка .

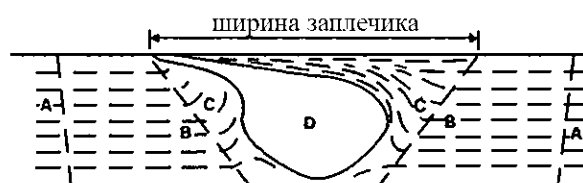


Рисунок 27.7 - Схема зон стыкового соединения, выполненного СТП:

- А – основной металл,
- В – зона термического влияния (ЗТВ),
- С – зона термомеханического влияния,
- Д – зона динамической рекристаллизации (сторона набегания слева).

Судя по экспериментальным результатам TWI, максимальная температура при сварке трением с перемешиванием составляет около 70% значения температуры плавления и для алюминия не превышает 550°С. Тепловложение при СТП меньше, чем при аргонодуговой сварке примерно в 2 раза и для сплава 6N01 – T5 толщиной 4 мм равно соответственно 190 и 390 Дж/мм (скорость сварки 500 мм/мин). С помощью математического моделирования тепловых процессов при СТП в работе построено распределение температур в свариваемой пластине (рисунок 8). Более низкая температура зоны соединения при сварке трением с перемешиванием по сравнению со сваркой плавящимся электродом объясняет меньший уровень угловых деформаций в сварном соединении. При СТП угловая деформация равна 1/5÷1/7 значений при СПЭ (рисунок 27.9).

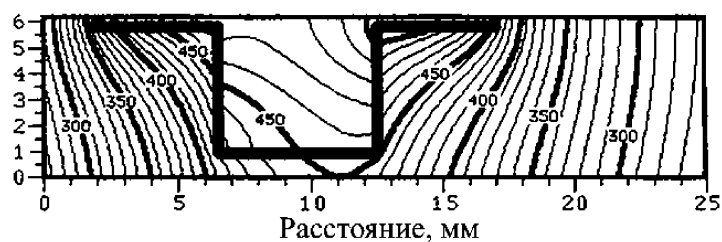


Рисунок 27.8 - Распределение температур в продольном сечении образца



Рисунок 27.9 - Сравнение угловой деформации при сварке трением с перемешиванием и сварке плавящимся электродом (алюминиевый сплав серии 6000, толщина 2 мм).

Предполагается, что из-за невысокого уровня температур процесса, остаточные напряжения низкие. Но жесткое закрепление налагает большие ограничения на деформацию пластин. Это препятствует сокращению металла при охлаждении зоны динамической рекристаллизации и зоны термического влияния (ЗТВ) в продольном и в поперечном направлении, приводя к поперечным и продольным остаточным напряжениям. При СТП сплавов 2024 – Т3 и 6013 – Т6 обнаружено, что продольные остаточные напряжения выше поперечных (скорость сварки составляла $300 \div 1000$ мм/мин, скорость вращения инструмента – $1000 \div 2500$ об/мин). Высокие растягивающие напряжения преобладают в ЗТВ. Величина остаточных напряжений уменьшается при снижении скорости сварки и скорости вращения инструмента. Максимальные значения продольных растягивающих напряжений достигают значений $30 \div 60\%$ предела текучести сварного соединения и $20 \div 50\%$ предела текучести основного металла.

Основной *недостаток* способа СТП - образование в конце шва отверстия, равного диаметру наконечника, что требует выведения шва за пределы рабочего сечения заготовки или заполнения отверстия после сварки с помощью других методов, таких как вварка трением специальных пробок.

Происходящее совершенствование технологии и оборудования позволяет преодолеть существующие недостатки, а также расширить области применения способа.

4. Перспективы развития сварки трением

За сравнительно короткое время промышленного использования сварка трением зарекомендовала себя как высокопроизводительный технологический процесс, позволяющий получать высококачественные соединения деталей из большого числа различных одноименных и разноименных металлов и сплавов и обладающий рядом других важных преимуществ. Это одна из основных причин быстрого внедрения сварки трением в различных отраслях машиностроения. Особенности процесса позволяют прогнозировать следующие пути дальнейшего развития сварки трением:

- разработка новых разновидностей процесса сварки трением с целью расширения возможностей его промышленного использования;
- выполнение технологических исследований в области расширения номенклатуры свариваемых трением новых материалов и установления оптимальных режимов их сварки;
- разработка новых образцов и систем универсального оборудования для сварки крупных деталей, а также для микросварки трением;
- создание простых и дешевых универсальных машин для оснащения ими ремонтных мастерских и производственных цехов с большой номенклатурой обрабатываемых деталей;
- создание специализированных машин-автоматов и комплексных линий, предназначенных для изготовления большого числа однотипных деталей;
- создание оборудования, оснащенного системами обратных связей и ведущего процесс сварки в заданном режиме, без отклонений при воздействии возмущающих факторов, что полностью исключает возможность брака при сварке;
 - выполнение исследований в области оптимизации процесса и создание (в перспективе) на этой базе самонастраивающихся машин-автоматов, снабженных компьютерами или подключаемых к ним.

Контрольные вопросы:

1. К какому виду сварки относится сварка трением?
2. Каковы основные принципиальные схемы и параметры режима сварки трением?
3. В чем особенность инерционной сварки?
4. Какой вид сварки трением позволяет соединять заготовки прямоугольной формы?
5. В чем преимущества и недостатки сварки трением?