

УДК 621.09.123

Л.М. Мурзин, канд. техн. наук, доцент,*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: mash@sevgtu14.sebastopol.ua***ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ**

Изучены эффекты сварки трением металлических стержней путем анализа кинетики изменения температуры и деформации материала в стыке в течение технологического процесса сварки. Разработаны регрессионные модели зависимости прочности, температуры и деформации от параметров режима сварки.

Ключевые слова: *сварка трением, эксперимент, температура, деформация, прочность.*

Введение. Сварка трением является разновидностью сварки давлением, при которой механическая энергия, подводимая к одной из свариваемых деталей, преобразуется в тепловую, при этом генерирование тепла в результате трения происходит непосредственно в месте будущего соединения.

В зоне стыка при сварке протекают следующие процессы. По мере увеличения частоты вращения свариваемых заготовок при наличии сжимающего давления происходит притирка контактных поверхностей и разрушение жировых пленок, присутствующих на них в исходном состоянии. Граничное трение уступает место сухому. В контакт вступают отдельные микровыступы, происходит их деформация и образование ювенильных участков с ненасыщенными связями поверхностных атомов, между которыми мгновенно формируются металлические связи и немедленно разрушаются вследствие относительного движения поверхностей.

Этот процесс происходит непрерывно и сопровождается увеличением фактической площади контакта и быстрым ростом температуры в стыке. С ростом температуры снижается сопротивление металла деформации. В зоне стыка появляется тонкий слой пластифицированного металла, выполняющего как бы роль смазочного материала. Под действием сжимающего усилия происходит вытеснение металла из стыка и сближение свариваемых заготовок (осадка). Контактные поверхности оказываются подготовленными к образованию сварного соединения: металл в зоне стыка обладает низким сопротивлением высокотемпературной деформации, оксидные пленки частично разрушены и удалены в грат, соединяемые поверхности активированы. После торможения, когда частота вращения приближается к нулю, происходит образование прочной связи между заготовками. При этом наблюдается понижение температуры металла в стыке за счет теплоотвода. Осадка сопровождается активным диффузионным процессом и образованием металлических связей по всей поверхности.

Расчеты и опыт практического применения сварки трением показывают, что ее пока целесообразно применять для сварки деталей диаметром от 6 до 100 мм. Наиболее эффективно применение сварки трением в сфере изготовления режущего инструмента при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных деталей. Наиболее целесообразно применение сварки трением для соединения заготовок из различных сталей, что имеет место при изготовлении сверл.

В настоящей работе предпринято экспериментальное исследование кинетики тепловых эффектов, определяющих качество сварного соединения. Основное внимание уделено исследованию процесса развития температуры и деформации в зоне сварки как в процессе вращения заготовок, так и после остановки вращения в процессе остывания сваренного изделия.

Целью работы является проведение экспериментальных и аналитических исследований сварки трением на примере сварки стальных стержней, имитирующих концевой инструмент.

Методика эксперимента. Образцы для исследований сварки трением изготовлены из стали 40.

Применяли два типа заготовок:

Тип 1 – с глухими торцами;

Тип 2 – в одном торце имеется отверстие, второй торец глухой.

Размеры заготовок типа 1: $D1 = 12,5$ мм; $D2 = 16$ мм; $L1 = 56,5$ мм; $L2 = 52,5$ мм.

Размеры заготовок типа 2: $D1 = 12,5$ мм; $D2 = 6$ мм; $D3 = 14,5$ мм; $L1 = 70$ мм; $L2 = 48$ мм.

Экспериментальные исследования включали проведение опытов по сварке с определением температуры в зоне стыка, осевой деформации образцов и опытов по измерению прочности при изгибе сваренных образцов. Они проведены по методике планирования эксперимента. Условия испытаний образцов и выходные критерии показаны в таблице 1. В качестве выходных критериев оценки результатов сварки приняты: прочность, температура в зоне сварки и осевая деформация образцов.

Таблица 1 – Исходные условия для проведения эксперимента и выходные критерии

Параметр	Размерность	Фактор	Уровень	
			нижний	верхний
P	Н	X1	100	150
n	об/мин	X2	1250	2500
t	сек	X3	5	10
I	б/р	X4	1	2
Прочность, σ	МПа	Y1		
Температура, θ	°С	Y2		
Деформация, Δl	мм	Y3		

Регрессионные модели для перечисленных в таблице 1 показателей представлены в виде выражений:

$$\sigma = f(I, n, P, t) = A_0 + A_1 t + A_2 n + A_3 P + A_4 I, \quad (1)$$

$$\theta = f(I, n, P, t) = A_0 + A_1 t + A_2 n + A_3 P + A_4 I, \quad (2)$$

$$\Delta l = f(I, n, P, t) = A_0 + A_1 t + A_2 n + A_3 P + A_4 I. \quad (3)$$

где n – частота вращения шпинделя станка; P – усилие прижатия заготовок; t – время прижатия до остановки шпинделя; I – тип (форма торцов).

При 4 факторах и 2 уровнях число опытов ДФЭ $2^{4-1} = 8$. Количество повторных опытов равно 2. Необходимое число опытов для определения коэффициентов модели (1) равно 5, остальные опыты используются для вычисления статистических характеристик модели. Для построения матрицы плана используем генерирующее соотношение $x_4 = x_1 * x_2 * x_3$. Матрица плана-эксперимента ДФЭ 2^{4-1} показана в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица плана эксперимента ДФЭ 2^{4-1}

N опыта	X1	X2	X3	X4	Yi
1	1	1	1	1	
2	1	1	-1	-1	
3	1	-1	1	-1	
4	1	-1	-1	1	
5	-1	1	1	-1	
6	-1	1	-1	1	
7	-1	-1	1	1	
8	-1	-1	-1	-1	

Результаты и их обсуждение. Примеры кадров программ видеосъемки опытов сварки с визуальными световыми эффектами показаны на рисунках 1 и 2. Эти кадры использованы для количественных оценок температуры в зоне стыка и осевой деформации образцов при сварке.

По кадровым программам опытов сварки определяли кинетику изменения температуры в зоне стыка и осевой деформации образцов. В результате такой обработки построены графики зависимости температуры (рисунок 3) и осевой деформации (рисунок 4) от времени сварки.

Из результатов опытов следует, что высокой прочности стыков типа 1 и типа 2 можно достигнуть различными приемами. Так, высокая прочность стыка типа 1 достигнута при числе оборотов $n = 2500$ об/мин, нагрузке $P = 15$ кг и длительности сварки $t = 8$ с (см. рисунок 1). Таким образом, в этом случае обеспечена высокая скорость относительного движения частей свариваемых заготовок и большая продолжительность процесса сварки. Высокая прочность стыка типа 2 достигнута при числе оборотов $n = 1250$ об/мин, нагрузке $P = 10$ кг и длительности сварки $t = 3,5$ с (рисунок 2). В этом случае обеспечена невысокая скорость относительного движения частей свариваемых заготовок и меньшая продолжительность процесса сварки.

Температура по торцу образца при нагреве распределяется неравномерно, что следует из приведенных рисунков и графиков. Особенно существенна неравномерность распределения температуры при нагреве образцов типа 2. В нижней части стыка температура выше, чем в верхней части стыка (рисунок 3). При охлаждении образцов типа 2 также наблюдается неравномерность распределения температуры по сечению, а в случае образца типа 1 температура по сечению распределяется равномерно.

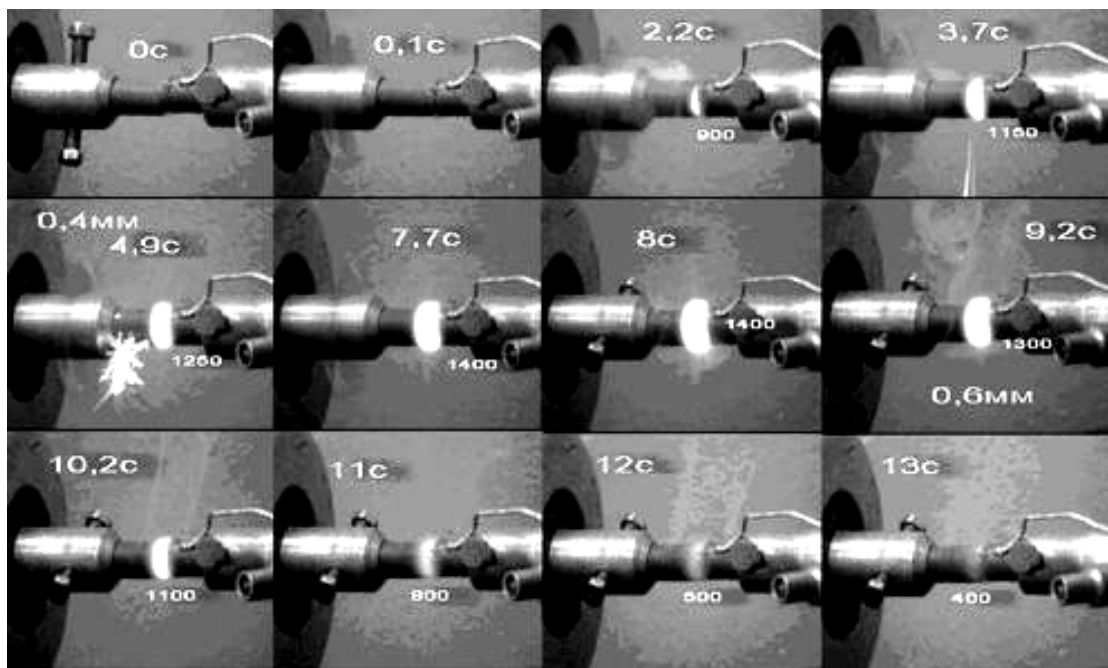


Рисунок 1 – Опыт № 6. Образцы типа 1: $P = 150$ Н; $t = 8$ с; $n = 2500$ об/мин; прочность высокая

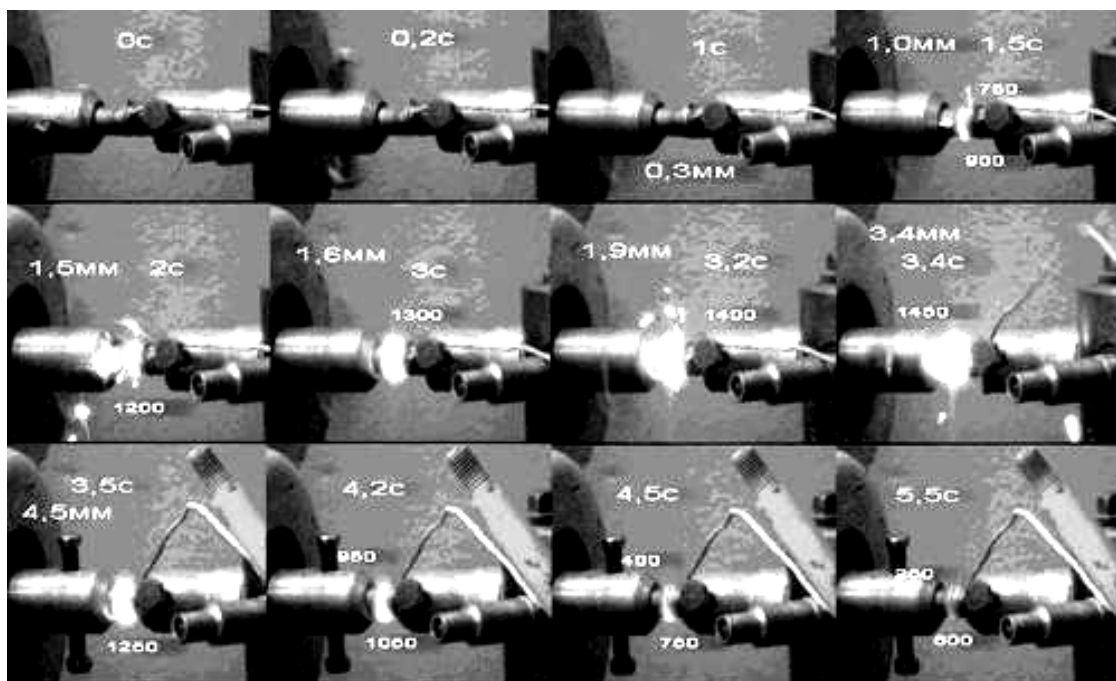


Рисунок 2 – Опыт № 3. Образцы типа 2: $P = 100$ Н; $t = 3,5$ с; $n = 1250$ об/мин; прочность высокая

Характерные различия обнаружены также в поведении нагретого до высокой температуры материала на образцах разных типов. В случае образцов типа 2 от зоны стыка веером разлетаются нагретые частицы. По характеру свечения таких частиц можно утверждать, что материал этих частиц находится в жидком состоянии или в предплавленном состоянии, т.е. поверхностный слой в зоне стыка образцов периодически отрывается в жидком состоянии и открывает новый, менее разогретый слой. Этот процесс периодически повторяется (кадрограммы опыта 3 на рисунке 2). Следовательно, процесс нагрева зоны стыка таких образцов неустойчив. В результате образуется неоднородная структура сварного шва, что подтверждают результаты изучения поверхности излома таких образцов (обнаружены неоднородности в виде пятен оксидов).

В случае сварки образцов типа 1 раскаленные частицы отрываются на первой стадии нагрева, т.е. в процессе приработки поверхностей стыка. В дальнейшем разогрев зоны стыка происходит устойчиво. Срыв поверхностного слоя при высокой температуре не зафиксирован. В результате такого процесса образуется однородный сварной шов, что и обнаружено при изучении поверхности излома образцов.

Результаты исследования прочности образцов, максимальной температуры в зоне сварки и осевой деформации при сварке трением показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сварки образцов

№ опыта	Тип	Длина плеча L , мм	Усилие разруш. P , Н	Диаметр стыка d , мм	Прочность σ , МПа	Температура θ , °С	Деформация Δl , мм
1	2	705	220	12–6	480	1400	1,4
2	2	705	30	10	180	1300	0,6
3	2	705	240	12	510	1400	2,4
4	1	705	20	8	206	700	0,05
5	1	705	190	8	413	1100	0,2
6	1	1000	320	14	1166	1450	0,5
7	1	705	20	9	12	600	0,04
8	2	705	10	11–6	5	400	0,03

Результаты обработаны по программе планирования экспериментов Plan.exe и получены следующие модели:

$$\sigma = f(I, n, P, t) = -303,875 - 6,9t + 0,3026n - 10,1P + 190I, \quad (4)$$

Расчетный критерий Фишера $F_p = 7979$, табличный $F_t = 4,066$ – модель неадекватна.

$$\theta = f(I, n, P, t) = -795 + 32,35t + 0,4245n + 63,4P + 0I, \quad (5)$$

Расчетный критерий Фишера $F_p = 1802$, табличный $F_t = 3,84$ – модель неадекватна.

$$\Delta l = f(I, n, P, t) = -2,2338 + 0,142t + 0n + 0,18P - 0,305I, \quad (6)$$

Расчетный критерий Фишера $F_p = 367,77$, табличный $F_t = 3,8379$ – модель неадекватна.

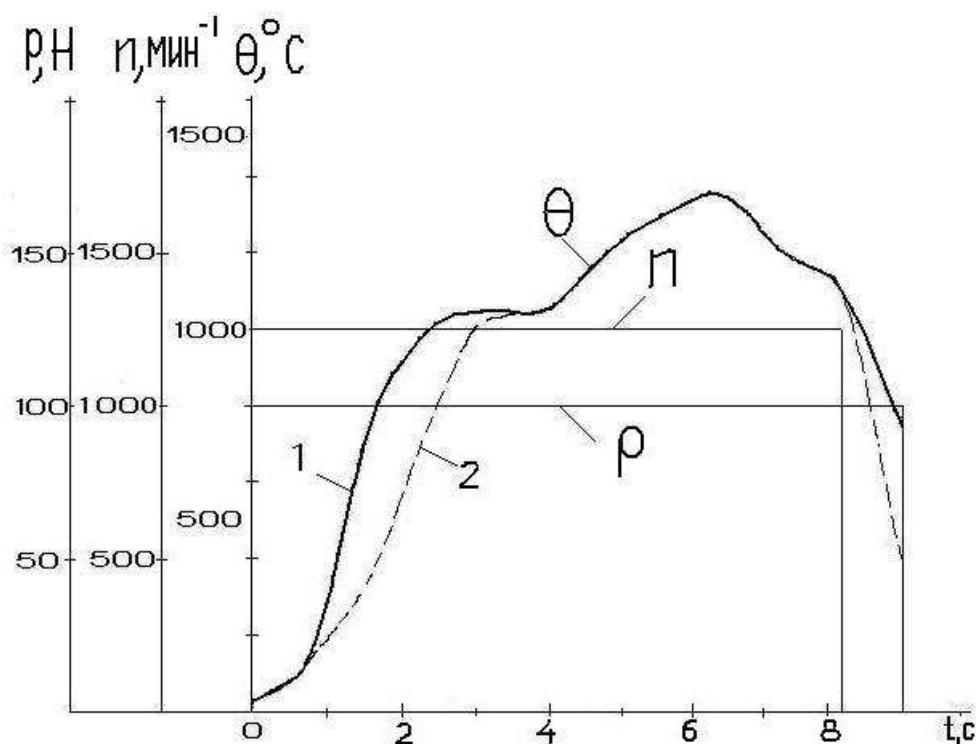


Рисунок 3 – Опыт 3. Кинетика изменения температуры, 1– низ стыка, 2– верх стыка

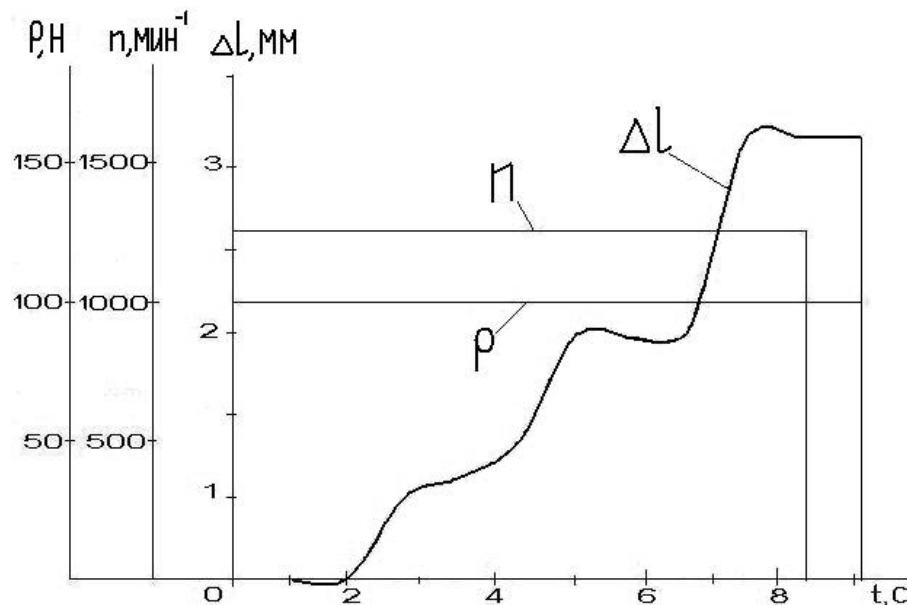


Рисунок 4 – Опыт 3. Кинетика изменения деформации

1. Анализ регрессионных моделей

Обработка результатов опытов по сварке привела к получению неадекватных моделей по критерию Фишера. Одной из причин, которая приводит к неадекватности моделей при экспериментальном исследовании могут быть неточности в измерении показателей процесса сварки, а именно, температуры и осевой деформации вследствие недостаточного количества экспериментов. Измерение температуры и деформации произведено по кадрогармам видеосъемок при однократном проведении опытов согласно матрице плана экспериментов. В этих условиях ошибки в измерении показателей могут быть значительными, что и приводит к построению неадекватных моделей. Однако, следует отметить, что показатель при коэффициенте формы I в модели зависимости прочности существенно выше, чем в модели зависимости температуры, что можно признать вполне закономерным явлением. Форма поверхности стыка в значительной мере определяет прочность сварки, но незначительно влияет на температуру, развивающуюся на поверхности в месте стыка. На температуру в зоне стыка большее влияние оказывают скорость относительного скольжения частей заготовки и усилие прижатия.

2. Теплофизические явления

Проанализируем теплофизические процессы, протекающие в зоне сварки и кинетику их развития на основе полученных результатов исследования температуры в зоне стыка, характера протекания деформации и изучения поверхностей излома сваренных образцов.

Нагрев материала при трении увеличивается по направлению от оси образцов к периферии сечения. При малой скорости относительного движения вблизи оси образцов образуется холодная зона, в которой при нагружении образцов внешней осевой силой возникают упругие деформации.

Нагрев такой зоны и переход материала в пластичное состояние (или вязкое) возможен только за счет потока тепла от нагретой поверхности. Этот процесс требует большего времени для достижения высокой температуры вблизи оси образца. Конкурентным процессом в этом случае является процесс рассеяния тепла, т.е. тепло нагревает все больший объем материала вдоль образца и зона нагрева расширяется.

При большой скорости относительного движения, в радиальном направлении создается весьма неоднородное температурное поле. На поверхности температура может достигнуть уровня температуры плавления и материал там будет в жидком состоянии, в то время как ближе к оси образца нагрев незначителен (при равенстве нулю скорости относительного движения на оси теплота не выделяется) и материал там будет в упругом состоянии. «Твердый» материал вблизи оси образца предотвращает возможность существенной общей деформации по сечению образца и, таким образом, образование сварного шва затруднительно. Разогретый поверхностный слой, не участвующий в образовании сварного шва по причине отсутствия осевой деформации может срываться с поверхности в виде раскаленных жидких капель под действием центробежных сил. Это явление и наблюдается в опытах при большой скорости вращения и малом времени сварки (рисунок 1).

Таким образом, при создании теплофизической модели процесса сварки следует провести анализ процессов образования тепловых источников и процесс рассеяния тепла в материале свариваемых стержней.

3. Источники тепла

Источником тепла при сварке трением является работа сил трения Q при относительном движении свариваемых частей заготовки. Величину этой работы можно определить по формуле

$$Q = Fv\tau, \quad (7)$$

где F – сила трения, v – скорость относительного движения, τ – продолжительность относительного движения. Скорость относительного движения определяется по соотношению

$$v = \pi D_T n, \quad (8)$$

где D_T – текущий диаметр (расстояние от оси заготовки до рассматриваемой точки стыка); n – число оборотов вращения шпинделя. Текущий диаметр изменяется от 0 до величины диаметра заготовки D_3 , следовательно, скорость относительного движения увеличивается по линейному закону с ростом D_T при постоянном числе оборотов шпинделя. Сила трения зависит от осевой силы P и определяется по соотношению

$$F = P\mu, \quad (9)$$

где μ – коэффициент трения. Коэффициент трения зависит от состояния поверхностей свариваемых заготовок и может меняться в значительных пределах от 0,5 до 0,05 при переходе от сухого трения к граничному или жидкостному и достигать величины 1 при схватывании соприкасаемых поверхностей. Учитывая сложный характер процессов, происходящих при относительном движении заготовок при сварке трением, можно полагать, что в разных частях стыка свариваемых заготовок могут одновременно действовать различные процессы. В зоне, прилегающей к оси заготовок трение практически отсутствует в связи с нулевой скоростью относительного движения. При малой скорости относительного движения в зоне с малыми текущими диаметрами материал заготовок нагревается незначительно и имеет место сухое трение. При большой скорости относительного движения в зоне, прилегающей к поверхности заготовки, материал может нагреваться до расплавления и в этом случае имеет место граничное или жидкостное трение. Однако, учитывая кратковременность процесса сварки, можно принять допущение о неизменности усредненной величины коэффициента трения по всей площади поверхности стыка. Примем $\mu = 0,3$.

На основании вышеизложенного и с учетом формул (7)–(9) получим результирующую формулу для оценки мощности источников тепла по плоскости стыка:

$$Q = \pi D_T n \mu P. \quad (10)$$

4. Стоки тепла

Рассеяние тепла по телу заготовки происходит путем теплопроводности, а с поверхности заготовки в зоне стыка происходит теплообмен с окружающей средой. При значительном разогреве зоны стыка до состояния светимости и, далее, до состояния расплавления, к указанным механизмам теплопередачи добавляется излучение. Провести анализ тепловых потоков при действии всех механизмов теплопередачи не представляется возможным. С другой стороны, вклад теплоотдачи в общий эффект распределения температуры в зоне стыка весьма незначителен, учитывая незначительность суммарной площади наружной поверхности стыка с высокой температурой нагрева. Поэтому при анализе распределения температуры в зоне сварки ограничимся только оценкой явлений, возникающих вследствие теплопроводности в теле заготовки.

Согласно [2] функция источника описывает закон изменения температуры в виде выражения

$$\theta(x, \tau) = \frac{Q}{c\rho\sqrt{4\pi a\tau}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a\tau}\right], \quad (11)$$

где Q – мгновенно выделившееся количество теплоты.

В двух- и трехмерном пространстве эта формула имеет вид

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4a\tau)^{n/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a\tau}\right]. \quad (12)$$

Параметр n принимает значение 2 и 3 соответственно.

Выражения (11,12) представляют собой закон распределения температуры в бесконечном стержне, если в момент времени τ в точке x' мгновенно выделилось количество теплоты Q . В начальный момент времени $\tau=0$ температура в точке x' имеет некоторое максимальное значение, в то время как в других

точках тела температура равна нулю. С течением времени температуры во всех точках пространства начинают выравниваться путем их усреднения. Если тепло выделяется в течение некоторого промежутка времени с постоянной интенсивностью, т.е. действует стационарный источник тепла, то процесс выравнивания температуры замедляется. Используя принцип наложения температурных полей от элементарных источников теплоты путем интегрирования в пространстве и во времени можно построить температурное поле в случае действия тепловых источников разной интенсивности одновременно во всех точках пространства в течение некоторого промежутка времени для источника любой формы.

В общем виде для бесконечного тела выражение (12) будет выглядеть следующим образом

$$\theta(x, y, z, \tau) = \iiint_V \int_0^\tau \frac{Q}{c\rho(4a\tau)^{n/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a\tau}\right] dx'dy'dz'd\tau.$$

В случае сварки трением стержень можно рассматривать как линейное бесконечное тело. Развитие температуры в радиальном направлении следует рассматривать в приближении распределения источников одинаковой интенсивности по окружности одного радиуса. Источники, находящиеся на поверхности стержня в плоскости стыка, имеют максимальную мощность. Если пренебречь теплоотдачей в окружающую среду, то можно считать, что все тепло путем теплопроводности рассеивается в направлении оси стержня.

В этом случае будет происходить кумулятивный процесс сложения тепловых потоков, направленных к оси заготовки.

С увеличением скорости относительного движения соединяемых частей заготовок градиент температуры возрастает по направлению от оси к поверхности заготовки. При увеличении продолжительности трения частей заготовки градиент температуры уменьшается в осевом направлении по мере удаления от стыка и в радиальном направлении от поверхности к оси заготовки. Следовательно, влияние скорости относительного движения и продолжительности относительного движения приводит к различным результатам.

Скорость относительного движения определяется следующими факторами:

- число оборотов шпинделя. Число оборотов является константой.
- D – диаметр контактной зоны стыка. Окружная скорость изменяется от максимального значения на поверхности до нуля на оси контактирующих стержней.

Продолжительность относительного движения определяется временем контакта при вращении шпинделя и действии осевой нагрузки.

Выводы. Таким образом, достигнуть высокой прочности стыка при сварке и получить качественное сварное соединение можно, если применять оптимальное сочетание параметров режима сварки применительно к конкретному типу поверхностей стыка свариваемых заготовок. Исходя из экономических соображений, целесообразно применять образцы с кольцевой формой поверхности стыка, что обеспечивает достижение высоких показателей сварки при меньших затратах энергии и более высокой производительности процесса.

Перспективы развития работы. В развитие этой работы предполагается провести экспериментальное исследование кинетики сварки трением образцов в широком диапазоне диаметров стержней для определения оптимальных соотношений скорости относительного движения и продолжительности сварки, обеспечивающих высокие показатели качества сварки. В качестве заготовки будут использованы образцы из легированной стали и конструкционной углеродистой стали. Материалы этого исследования стали основой магистерской работы по специальности ТМ. Дальнейшие исследования предполагается проводить в рамках лабораторных работ по дисциплине «Упрочнение и восстановление деталей машин».

Библиографический список

1. Тихонцов О.М. Теплові процеси при механічній обробці матеріалів різанням / О.М. Тихонцов, С.І. Чухно, О.М. Коробочка. — К.: НМК ВО, 1993. — 280 с.

Поступила в редакцию 14.10.2009 г.