

DOI.org/10.5281/zenodo.399001

УДК 621.791.14:62-97

В.Н. Стаценко, Е.Н. Негода, А.Е. Сухорада, К.А. Полуцкий

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: vladsta@mail.ru

НЕГОДА ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., профессор, e-mail: negoda60@mail.ru

СУХОРАДА АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – магистрант, e-mail: alexeyman\_09@mail.ru

ПОЛУЦКИЙ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – магистрант, e-mail: Konstantin-poluckii@yandex.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690950

## Анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием

**Аннотация:** Приведен анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием. На основе проведенного авторами эксперимента определены температуры материала в зоне перемешивания, которые сопоставлены с расчетными значениями температур в зоне заплечика – части вращающегося инструмента. Для получения величины тепловой мощности, вносимой в зону сварки, авторами разработана программа в пакете Mathlab. Представлены результаты измерений и расчетов с помощью этой программы.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, технологические параметры, поля температур, испытания на разрыв.

### Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является относительно новым методом получения неразъемных соединений материалов, запатентована в 1991 году The Welding Institute (TWI), Великобритания [6]. Исследование данного процесса, направленное на совершенствование технологии и оборудования, позволило внедрить данный способ за рубежом в производство высокотехнологичных изделий в таких отраслях, как вагоно-, судо-, авиастроение и т.п. Сварка трением с перемешиванием относится к процессам соединения материалов в твердой фазе и поэтому лишена недостатков, связанных с расплавлением и испарением металла.

Поскольку основные исследования СТП носят коммерческий характер, то технологическая информация в публикациях ограничена и главным образом касается режимов сварки и конструкции инструмента.

Цель данной статьи – с помощью проведенного эксперимента найти основные зависимости между технологическими параметрами СТП. Эксперимент проводился на алюминиевом сплаве АМГб1 (1561), который используется в судостроении для изготовления надстроек судов и др.

### Методика эксперимента

Схема процесса СТП показана на рис. 1, а. Сварка велась вращающимся металлическим нерасходуемым инструментом. Инструмент (рис. 1, б) представляет собой стержень с буртом (заплечиком) диаметром  $D$ , из которого выступает пин диаметром  $d_{\text{п}}$  и длиной  $l_{\text{п}}$ . При сварке ось инструмента наклонена на угол  $\alpha$  относительно нормали. Инструмент, вращаясь с частотой  $\omega$ , по-

гружается в свариваемый металл на определенную глубину  $l$  и перемещается вдоль стыка деталей (углом «вперед») со скоростью сварки  $V_{св}$ . При этом заплечик защищает место сварки от воздействия окружающей среды.

В результате нагрева от трения и приложенного давления от силы  $P_z$  металл под буртом переходит в размягченное пластифицированное состояние. За счет перемешивания пластифицированного металла с помощью бурта и приложения к нему давления за инструментом образуется сварной шов.

К технологическим параметрам процесса СТП относятся:

- частота вращения инструмента  $\omega$ ;
- скорость сварки  $V_{св}$ ;
- угол наклона инструмента  $a$ ;
- глубина погружения инструмента  $l$  или осевое усилие  $P_z$ ;
- конструкция инструмента.

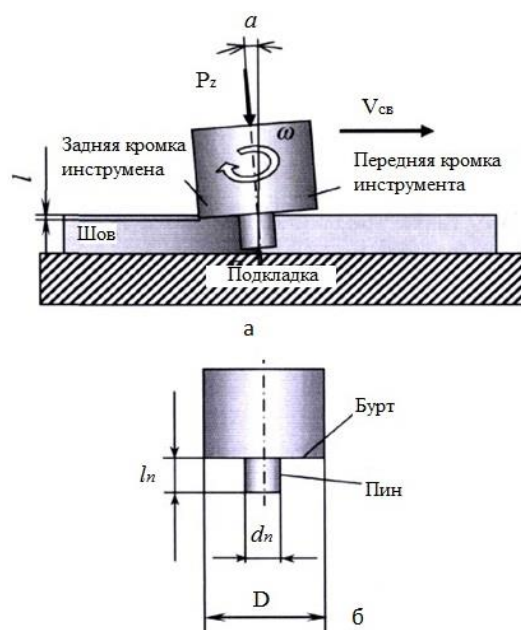


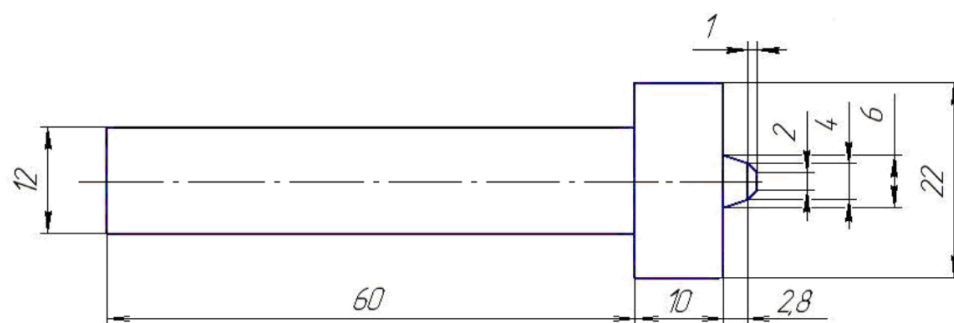
Рис. 1. Схема сварки трением с перемешиванием: а – схема СТП; б – инструмент для СТП.

При СТП сварочный инструмент испытывает интенсивные тепловое и силовое воздействия, которые лимитируют его срок службы. Изменение формы рабочей части инструмента приводит к нарушению стабильности сварочного процесса. Следует отметить, что попадание частиц износа инструмента в свариваемый материал может неблагоприятно сказываться на качестве сварного соединения.

Правильно выбранная конструкция инструмента, частота его вращения и угол наклона, а также скорость сварки обеспечивают стабильность ее процесса и высокое качество. На рис. 2 представлен чертеж инструмента, с помощью которого в данной работе проводилась сварка трением с перемешиванием. Материал инструмента Р6М5 – сталь инструментальная быстрорежущая [4, 5].

Сварка производилась с помощью универсально-фрезерного станка Opti MT100. Данный станок позволяет регулировать в широком диапазоне скорость сварки от 24 до 402 мм/мин, частоту вращения инструмента от 40 до 1660 об/мин, поворотная головка обеспечивает выбор угол наклона инструмента в диапазоне от 0 до 90°.

Температура металла в месте сварки значительно влияет на его пластичность и интенсивность перемешивания, т.е. на качество сварки. Температура определялась величиной тепловой мощности (тепловложения), которая вносится в место сварки за счет трения между инструментом и материалом [2, 4].



а



б

Рис. 2. а – инструмент для СТП, б – фрагмент сваренных пластин на разных режимах.

Температуру в месте сварки сложно измерить из-за особенностей конструкции инструмента: его запечик прикрывает место сварки от внешней среды, кроме этого инструмент вращается и перемещается вдоль стыка деталей.

Доступный способ – расчет этой температуры, причем можно определить распределение значений температур вдоль толщины металла, а также по радиусу от центра вращения в разных направлениях относительно направления движения инструмента.

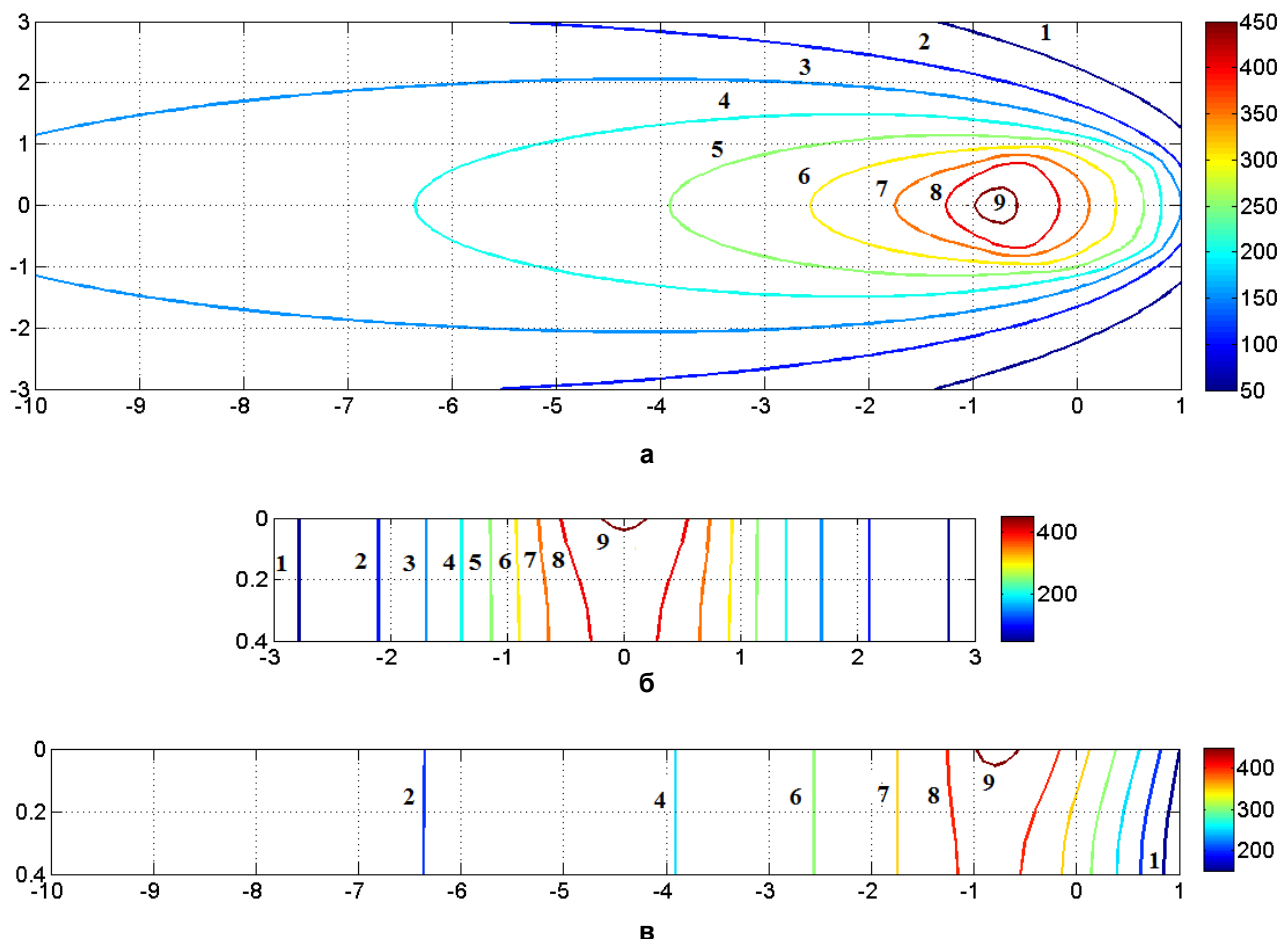
Расчет температуры места сварки по толщине исследуемого материала и по радиусу относительно оси вращения инструмента производился по программе, разработанной нами в пакете *Mathlab*. Результаты расчета распределения температур по длине пластины вдоль сварного шва, поперек пластины в сечении, проходящем через центр инструмента, и по толщине пластины приведены на рис. 3.

Для расчета распределения температур места сварки нам было необходимо опытным путем произвести замер температуры в нескольких точках, на определенном расстоянии относительно центра инструмента. Для измерения температуры поверхности исследуемой детали использовался инфракрасный пирометр “Center 350”, точность измерений  $\pm 10$  °С.

### Результаты расчета распределения температур

Тепловложение в место сварки определялось по методу сопоставления температурных полей, полученных экспериментально с расчетными значениями. Режимные характеристики, использованные при опытах, вносились в разработанную программу, на основе полученных данных был построен график распределения температуры по детали в разных плоскостях (рис. 3). Далее сравнивались полученные опытные значения температур с расчетными температурами в точках на определенном расстоянии от центра инструмента. Если полученные расчетные данные с достаточной точностью совпадали с опытными результатами, тогда принимались расчетные значения тепломощности источника, т.е. количество введенного тепла в деталь [3].

Важным выводом этих расчетов является то, что максимум температуры находится на заднем крае заплечика по отношению к направлению движения инструмента, разница температур центр–край заплечика перед ним по ходу движения инструмента составляет 130–150 °С, а за ним – 200–230 °С, изменение температуры с 450 до 200 °С продолжается за инструментом на расстоянии 2,5 диаметров заплечика.



**Рис. 3. Результаты расчета распределения температур: а – по длине, б – ширине, в – толщине пластины из алюминиевого сплава толщиной 4 мм при сварке СТП со скоростью подачи 24 мм/мин: 1 –  $t = 50$  °С; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200; 5 – 250; 6 – 300; 7 – 350; 8 – 400; 9 –  $t = 450$  °С.**

Эффективность заданного режима получения сварного соединения можно оценить по его прочности. В нашей работе проверялась прочность сварного соединения на разрыв. То есть после проведения серии экспериментов производилась вырезка образцов сварных соединений размерами длины рабочей и захватной частей по 50 мм. При этом для каждого режима изготавливались и испытывались по 2 образца.

### Испытания образцов на разрыв

Испытания образцов на разрыв производились по ГОСТ 1497-84 [1] на универсальной испытательной машине фирмы Shimadzu серии AGS-X 100kN (рис. 4), предназначенной для проведения механических испытаний различных материалов, в том числе металлов, древесины, пластиков. Машины этой серии обеспечивают достаточную производительность и воспроизводимость результатов. Технические характеристики испытательной машины AGS-100kN представлены в табл. 1.



а



б

Рис. 4. а – испытательная машина фирмы Shimadzu серии AGS-X 100kN, б – установка образца в захваты.

Таблица 1

**Технические характеристики испытательной машины AGS-100kN**

Максимально допустимая нагрузка			100 кН
Способ нагружения			Прямой, высокоточный, постоянный контроль деформации с использованием прецизионного привода с винтом на шаровой опоре
Измерение усилия	Точность	Блок стандартной точности (1/500; ± 1%)	В пределах ± 1% от значения силы (от 1/500 до 1/1 номинальной мощности нагрузочного элемента). Соответствует EN 10002-2 Grade 1, ISO 7500-1 Class 1, BS 1610 Class 1, и ASTM E4, JIS B7721 Class 1.
	Калибровка усилия		
Скорость траверсы		Диапазон скорости	от 0,001 до 800 мм/мин (произвольная плавная установка)
		Скорость возврата макс.	1100 мм/мин
Точность скорости траверсы			± 0,1%
Расстояние между траверсой и площадкой (ход при растяжении)			1255 мм (745 мм)

**Результаты измерения прочности сварного соединения**

Испытания образцов на растяжение проводились со скоростью нагружения 7 Н/мм<sup>2</sup>/с. Результаты испытаний и их обработка представлены в табл. 2.

**Результаты измерения прочности сварного соединения**

Образец, №	Режимы сварки			Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Среднее значение предела прочности $\sigma_B$ , МПа	Место разрыва
	Скорость подачи, мм/мин	Частота вращения, об/мин	Угол наклона инструмента, $\alpha^\circ$			
1.2	42	850	2	159	152,5	По шву
1.3				146		
2.2	74	850	2	125	128,5	По шву
2.3				132		
3.1	98	850	2	120	130	По шву
3.3				140		
4.1	42	1660	2	182	173,5	По шву
4.2				165		
5.1	74	1660	2	122	131,5	По шву
5.3				141		
6.1	98	1660	2	96	93,5	По шву
6.3				91		

**Выводы**

Результаты испытаний прочности сварных соединений при различных режимах позволяют сделать вывод: с увеличением скорости подачи (скорости сварки) прочность соединения уменьшается. Так, при частоте вращения рабочего инструмента 850 об/мин, при увеличении скорости подачи с 42 до 98 мм/мин, предел прочности сварного соединения уменьшается на 13%, а при частоте вращения 1660 об/мин – 46%. Также установлено, что наилучшим режимом по прочности является режим с частотой 1660 об/мин и скоростью подачи 42 мм/мин (№ 4 в табл. 2), он составляет 173,5 МПа. Разрыв образцов по шву можно объяснить недостаточной прочностью сварного соединения.

В дальнейшей работе будет производиться корректировка режимов сварки для получения наиболее прочного и качественного сварного соединения без видимых дефектов. Будет изготовлена серия образцов для измерения твердости различных зон сварного соединения, а также изучена их микроструктура.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. ИПК Изд-во стандартов, 1986. 28 с.
- Карманов В.В., Каменева А.Л., Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник ПНИИ. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. С. 67–80.
- Котлышев Р.Р., Шучев К.Г., Крамской А.В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Вестник ДГТУ. 2010. Т. 10, № 5. С. 648–654.
- Стаценко В.Н., Сухорада А.Е. Технология сварки пластин методом сварки трением с перемешиванием // Инновационная наука: сб. ст. Международной науч.-практ. конф., 21 октября 2016, Владивосток. Владивосток: ДВЦИТ, 2016. С. 32–40.
- Colligan K.J., Konkol P.J., Fisher J.J. et al. Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction. *Welding J.* 2003;March:34-40.
- US Pat. No 5460317. Friction stir butt welding. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham et al.; Publ. 1995.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

DOI.org/10.5281/zenodo.399001

Statsenko V., Nehoda E., Sukhorada A., Polutskiy K.

VLADIMIR STATSENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: vladsta@mail.ru  
EVGENIY NEGODA, Candidate of Engineering Sciences, Professor, e-mail: negoda60@mail.ru  
ALEXEY SUKHORADA, MA Student, e-mail: alexeyman\_09@mail.ru  
KONSTANTIN POLUTSKY, MA Student, e-mail: Konstantin-poluckii@yandex.ru  
Department of Welding Production, School of Engineering  
*Far Eastern Federal University*  
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950

## The analysis of the friction stir welding procedure

**Abstract:** The article presents the analysis of the friction stir welding techniques. An important issue of the work is to determine the temperature of the material in the mixing zone which is possible to do by calculating the design temperature in the shouldered piece of the rotating tool. To obtain the value of heat rate in the welding zone, a programme has been developed within the package Matlab. The results of the measurements and calculations obtained through the programme are presented in it.

*Key words:* friction stir welding, technological parameters, temperature field, gap test.

### REFERENCES

1. GOST 1497-84. Metals. Methods of tensile testing. Standards Publishing, 1986, p. 28.
2. Karmanov V.V., Kamenev A.L., Karmanov V.V. Friction welding with stirring of aluminum alloys: the Essence and specific features of the process, peculiarities of the structure of the weld. Vestnik PNIP. Aerospace Equipment. 2012;32:67-80.
3. Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Calculation of temperature during friction stir welding of aluminum alloys. Vestnik DSTU. 2010(10);5:648-654.
4. Statsenko V.N., Sukhorada A.E. Technology of welding plates by friction stir welding method. Innovative Science, Internat. Scientific Conference, October 21, 2016, Vladivostok. Proceedings, Vladivostok, DVTSIT, 2016, p. 32-40.
5. Colligan K.J., Konkol P.J., Fisher J.J. et al. Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction. Welding J. 2003;March:34-40.
6. US Pat. No 5460317. Friction stir butt welding. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham et al.; Publ. 1995.