МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

**Том 3. Математика**

Сборник научных трудов
XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых

**27–30 апреля 2021 г.**

# PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

**Volume 3. Mathematics**

Abstracts
XVIII International Conference of students, graduate students and young scientists

**April 27–30, 2021**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Национальный исследовательский Томский государственный университет

FIRMITAS · UTILITAS · VENUSTAS ТГАСУ

ТУСУР TUSUR UNIVERSITY
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ТОМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Томск 2021

УДК 539.3

# АНАЛИЗ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

К.В. Иохим

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. В.А. Скрипняк

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: iokhim.k@mail.ru

# ANALYSIS OF THE PLASTIC FLOW OF TITANIUM ALLOYS IN THE PROCESS OF LINEAR FRICTION WELDING

K.V. Iokhim

Scientific adviser: professor, Ph.D. V.A. Skripnyak

Tomsk State University,Russia, Tomsk, Lenin Ave., 36, 634050

Email: iokhim.k@mail.ru

***Abstract**: The paper presents the results of the analysis of the plastic flow of titanium alloys in the process of linear friction welding (LFW). LFW is a high-tech process for joining structural elements of aerospace technology made of light and heat-resistant alloys. Experimental studies of the LFW regimes of such alloys are expensive and technically difficult. Numerical modeling was carried out to understand the physics of the LFW process and the laws governing the formation of a strong bond of titanium alloys. The simulation was carried out using the LS DYNA software package (ANSYS WB 15.2) and the developed module for the governing equation.*

**Введение.** В современной инженерной практике используются две модификации технологии сварки трением: линейная сварка трением и сварка трением с перемешиванием. Сварка трением - это технология, которая позволяет сваривать два или более одинаковых, или разнородных материала с разными температурами плавления, используя тепло, выделяемое трением, а также механическое перемешивание материалов на стыковой поверхности. Сварка трением позволяет получать прочные сварные соединения различных сплавов, содержащих элементы, такие как титан, алюминий, магний и др., а также для получения сварных соединений сталей. Линейная сварка трением позволяет получить прочное соединение материалов в плоскости контактной поверхности движущихся тел за счет тепловыделения при трении и переноса частиц материала между контактирующими телами [1-4].

**Численное моделирование.** В данной работе на основе программного обеспечения LS DYNA (ANSYS WB 15.2) была разработана связанная трехмерная вычислительная модель термомеханического процесса линейной сварки трением (ЛСТ). Модель применялась для ЛСТ-моделирования деформируемых блоков пары трения (рис. 1). Размеры блоков для модели SPH (гидродинамика гладких частиц): $a$ = 2,5 мм; $b$ = 5 мм; $L_0$ = 2,5 мм; $d = b / 2$. Система частиц формировалась в блоках с начальной длиной сглаживания 0,1 мм. Частицы с одинаковой начальной плотностью имели одинаковый начальный объем. Для численного моделирования в программе LSDyna / WB ANSYS 15.2 использовался метод SPH с переменной длиной сглаживания. Нижний блок перемещался вперед и назад со скоростью, которая

изменялась как $\bar{v} = \bar{v}_0 \cdot \sin(\omega t)$. Процесс сварки трением моделировался при частоте изменения скорости 50 Гц. Диапазоны амплитуд смещения и частоты изменения скорости выбирались в соответствии с параметрами, реализованными в экспериментах Мак Эндрю на ЛСТ блоках титанового сплава Ti-6Al-4V [5].

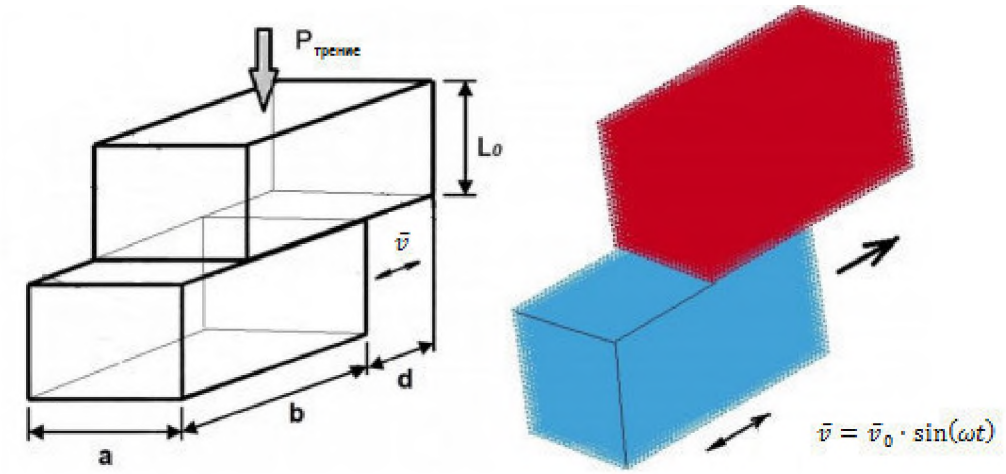


*Рис. 1. Схема процесса ЛСТ*

**Результаты.** Формирование прочного сварного соединения деталей при использовании технологии ЛСТ связано с процессами диффузии и массопереноса на границе деталей.

Оба этих процесса описываются с помощью используемой вычислительной модели. С помощью модели было показано распределение эффективной пластической деформации вблизи поверхности трения, которая образуется при циклическом движении нижнего блока (рис.2).

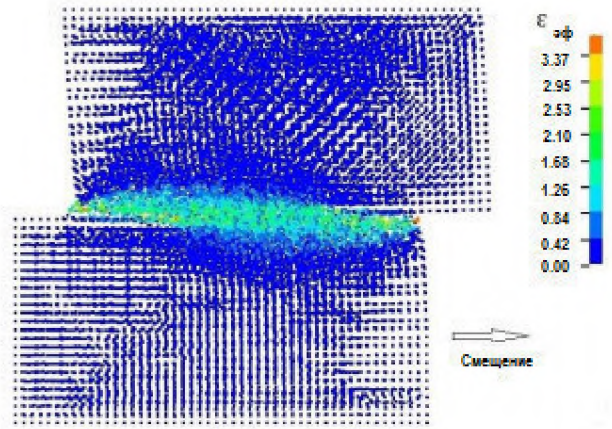


*Рис. 2. Распределение эффективной пластической деформации вблизи поверхности трения*

Полученные результаты свидетельствуют о том, что пластическое течение приповерхностных слоев материала блока распределено неоднородно по глубине и площади контактирующих блоков. Воздействие давления в зоне контакта блоков предотвращает возникновение повреждений в пластически деформируемом материале даже при возникновении растягивающих напряжений. Благодаря этому

титановые сплавы в приповерхностных слоях могут деформироваться в режиме интенсивной пластической деформации.

Выдавливание сплава из зоны сварки трением вызывается градиентом давления, что приводит к значительному уменьшению напряжения течения сплава в результате нагрева.

Результаты моделирования свидетельствуют об отклонении плоскости симметрии зоны пластической деформации от исходного положения плоскости контакта свариваемых блоков. Этот эффект влияет на плоскостность сварных швов, их механические свойства и поля остаточных напряжений в соединениях. Фазовый переход альфа (HCP) - beta (BCC) титановых сплавов при нагреве в процессе ЛСТ приводит к изменению механических свойств сплавов.

Следовательно, для получения сварного соединения необходимо увеличить время нагружения ЛСТ и величину накопленной пластической деформации.

**Заключение.** Выводы, которые можно сделать на основе численного моделирования, следующие:

1) Формирование сварного соединения происходит в сложном и нестационарном напряженно-деформированном состоянии.

2) В приповерхностных слоях свариваемых тел титановые сплавы могут деформироваться в режиме интенсивной пластической деформации.

3) Отклонение плоскости симметрии зоны пластической деформации от исходного положения плоскости контакта свариваемых тел происходит в процессе ЛСТ.

4) Экструзия материала из зоны сварного соединения в поперечном направлении по отношению к перемещению тел вызывается градиентом давления.

5) Фазовый переход от гексагональной плотноупакованной к объёмно-центрированной решетке титановых сплавов при нагреве в процессе ЛСТ требует увеличения времени циклического нагружения для получения сварного соединения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Cam, G., Simar, A., Gerlich, A., Khodabakhshi, F., Mostafaei, A., Field, D.P., Robson, J.D., Deschamps, A., Withers, P. J. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution // Progress in Materials Science. – 2020. – P. 1-67.
2. Venu, B., BhavyaSwathi, I., Raju, L.S., Santhanam G. A review on friction stir welding of various metals and its variable // Materials Today: Proceedings. – 2019. V. 18, Part 1. – P. 298-302.
3. Sai, S., Dhinakaran, M., Manoj, V., Kumar, K. P., Rajkumar, V., Stalin, B., Sathish, T. A systematic review of effect of different welding process on mechanical properties of grade 5 titanium alloy. // Materials Today: Proceedings. – 2020. V. 21, Part 1. P. 948-953.
4. Gotawala, N., Shrivastava A. Microstructural analysis and mechanical behavior of SS 304 and titanium joint from friction stir butt welding // Materials Science & Engineering. – 2020. – V. 789. – P. 139658.
5. McAndrew, A.R., Colegrove, P.A., Flipo, B.C.D., Bühr, C. 3D modelling of Ti–6Al–4V linear friction welds // Science and Technology of Welding and Joining. – 2016. V. 22(6). – P. 496–504.