

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.791, 539.3

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ
ЛИНЕЙНОЙ И ИНЕРЦИОННОЙ СВАРКИ
ТРЕНИЕМ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ© 2025 г. А. Ю. Медведев¹, В. Р. Галимов¹, А. Н. Паутов¹,
А. А. Миниахметов², Т. Т. Фозилов^{2, 3, *}¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия²Научно-исследовательский институт технологии
и организации производства двигателей, Москва, Россия³Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия

*e-mail: fozbourne@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.06.2024 г.

После доработки 10.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В настоящей статье рассмотрены процессы инерционной и линейной сварки трением жаропрочных никелевых сплавов ВЖ-175, ЭП-742 и ЭП-741. В статье дано описание разработанных программ для анализа характеристик для линейной и инерционной сварки трением. Также описаны разработанные конечно-разностные модели температурного поля, главными особенностями которых является движение границы трения, имитирующее процесс осадки. Проведен анализ кинематических, силовых, энергетических и температурных характеристик циклов линейной и ротационной сварки трением. Сравнение циклов линейной и ротационной сварки по 14 характеристикам показало, что наиболее информативными с точки зрения трансфера данных являются скорость и величина осадки, температура в стыке, удельная тепловая мощность, работа по осадке единицы объема, а также коэффициент трения.

Ключевые слова: линейная сварка трением, инерционная сварка трением, жаропрочные никелевые сплавы, моделирование температурного поля сварки трением

DOI: 10.31857/S0235711925020082, EDN: DGEKDL

Повышение характеристик авиационных двигателей сопряжено с требованиями по обеспечению эксплуатационных свойств материалов. В частности, это касается жаропрочных никелевых сплавов, используемых в элементах турбины. Однако улучшение свойств материалов напрямую связано с повышением степени легирования или услужением структурно-фазового состава, что затрудняет их обработку и соединение, в частности, способами сварки плавлением [1]. Для соединения подобных узлов находят применение способы сварки в твердой фазе, особенно — сварка трением.

В авиадвигателестроении получили распространение способы линейной и ротационной сварки трением. Линейная сварка трением (ЛСТ) применяется при изготовлении блисков [2]. Ротационная сварка трением (РСТ) возможна в двух вариантах — с прямым приводом и инерционная (ИСТ). Способ ИСТ нашел применение

для сварки роторов компрессоров и турбин [3, 4]. Необходимость освоения технологии инерционной сварки трением никелевых сплавов традиционно сопряжена с необходимостью проведения цикла подготовительных работ, которые в несколько раз увеличивают трудоемкость процесса.

Обзор литературы, посвященной тематике сварки трением, показывает, что ротационная и линейная сварка трением (ЛСТ) рассматриваются обособленно друг от друга даже в работах, посвященных комплексному рассмотрению технологий сварки трением. Так, в работе [5] авторы описывают процесс линейной и ротационной сварки трением, отмечают, что физические процессы образования соединения схожи, а также перечисляют общие преимущества и недостатки. Однако когда доходит до описания параметров режима, расчета вводимой тепловой энергии, процессы рассматриваются в отдельных разделах без сравнения. Единственное, что упоминается, так это ключевое отличие между процессами, которое заключается в характере движения, генерирующего трения — для ЛСТ это колебательное движение, а для РСТ это вращательное движение.

Хотя линейная и ротационная сварка трением являются родственными процессами, отсутствуют работы, в которых установлена связь между параметрами режима данных способов, что усложняет освоение сварки трением новых материалов и изделий обоими способами. В связи с этим целью исследования является сравнительный анализ двух процессов и определение возможности переноса опыта с одного метода сварки на другой и наоборот.

При сварке трением важную роль играет моделирование процессов, особенно температурной задачи. В этой области имеется множество подходов, общих для обоих способов сварки. Наиболее распространены численные методы решения, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) или конечных разностей (МКР). Первые используются преимущественно в задачах, где целью стоит повторить особенности геометрии свариваемых образцов или обеспечить совместное решение тепловой и деформационной задач. Так, например, в [6] описываются результаты моделирования ЛСТ образцов-параллелепипедов из сплава Ti6Al4V, где кроме расчета температур, имитировался выход грата из зоны трения. В таких условиях, построение геометрии образца и грата возможно только с использованием МКЭ. Схожая задача решалась и для ИСТ в работе [7], но для полых стержней из высоколегированной стали 17-4 PH. Однако сложность таких задач усложняет вычислительный процесс, поэтому использование для решения только тепловой задачи такой подход применяют реже.

В противовес, использование МКР позволяет упростить решение в случаях, не требующих учитывать геометрию свариваемых образцов. Такие модели требуют меньше времени и вычислительных мощностей, но в то же время позволяют учитывать особенности теплофизических свойств свариваемых образцов, особенно в случае сварки разнородных материалов [8] или сварки деталей разного сечения типа Т-образных соединений [9].

Методы. Для исследования были отобраны 6 циклограмм процесса сварки. Три циклограммы линейной сварки трением сплавов ЭП741, ЭП714 и ВЖ175 и три инерционной сварки трением сплава ЭП741 на трех сочетаниях режимов. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав свариваемых сплавов

Сплав	Ni, %	Cr, %	Ti, %	W, %	Mo, %	Co, %	Al, %	Fe, %	Nb, %
ЭП742	основа	13–15	2.4–2.8	0–2.0	4.5–5.5	9.0–11.0	2.5–3.0	1.0	2.5–3.0
ЭП741	основа	8–10	1.3–1.7	4.0–5.0	2.0–3.0	15.0–16.5	4.0–5.0	0.5	1.0–1.5
ВЖ175	основа	9–11	2.3–2.8	2.0–3.5	4.0–5.0	15.0–16.0	3.5–4.0	0.5	4.0–4.5

При ЛСТ сваривалось прямоугольное сечение размером 13×26 мм. Для ИСТ использовались образцы со свариваемым сечением в форме кольца с наружным диаметром 80 мм и внутренним диаметром 60 мм (рис. 1).

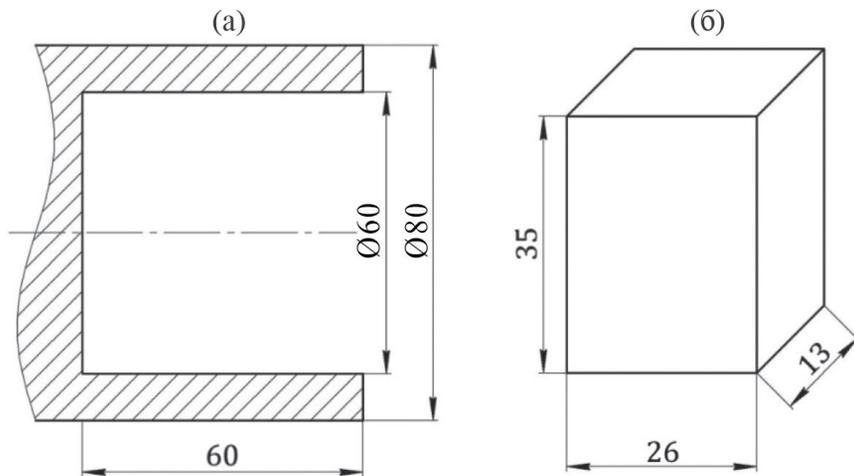


Рис. 1. Форма свариваемых заготовок для ИСТ (а) и ЛСТ (б).

В качестве данных о процессах сварки методами линейной и инерционной сварки трением рассматривались циклограммы параметров — величины осадки, давления и скорости вращения (для ИСТ) или скорости колебательного движения (для ЛСТ) (рис. 2). Параметры режима приведены в табл. 2, 3.

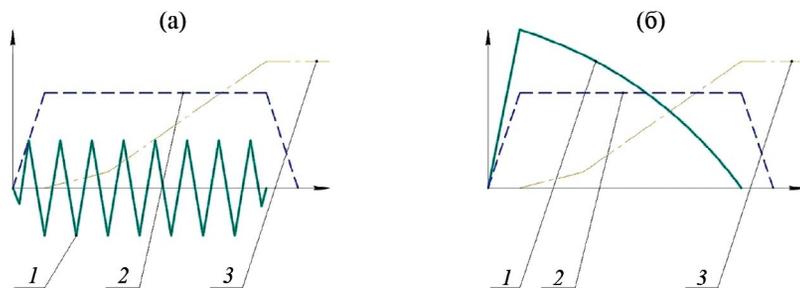


Рис. 2. Принципиальная схема процесса ИСТ (а) и ЛСТ (б): 1 — скорость генерирующего трение движения; 2 — осевое давление; 3 — осадка.

Таблица 2. Параметры режима ЛСТ, принятые для сварки образцов

Параметр	ВЖ-175	ЭП-742	ЭП-741
Размер образцов, д×ш×в, мм	13×26×35	13×26×35	13×26×35
Частота колебаний f , Гц	50	50	50
Амплитуда колебаний A , мм	2.0	2.0	2.0
Давление сварки P , Мпа	440	440	600
Суммарная осадка l_{oc} , мм	1.9	1.9	1.9

Таблица 3. Параметры режима ИСТ, принятые для сварки образцов

Параметр	1	2	3
Размер образцов ($D_{\text{нар}} \times D_{\text{внутр}} \times s$), мм	80×60×60	80×60×60	80×60×60
Максимальная линейная скорость на наружном диаметре $v_{\text{макс}}$, м/с	2.0	2.0	2.5
Давление сварки P , Мпа	400	450	400
Суммарная осадка $l_{\text{ос}}$, мм	2.7	3.5	10.0

Процессы ИСТ и ЛСТ отличаются характером генерирующего тепло движения. Данное отличие повлияло на подход к моделированию генерируемой трением тепловой мощности. Для анализа кинематических, силовых, энергетических и температурных параметров были разработаны модели для каждого из процессов. Каждая модель состоит из нескольких блоков: 1) импорт исходных данных — данный блок считывает данные о процессе сварки и, при необходимости, обрабатывает их; 2) расчет кинематических и силовых характеристик — данный блок производит определение некоторых силовых и кинематических показателей, например, коэффициент трения за цикл сварки, его максимальное и среднее значение и т.д.; 3) расчет энергетических характеристик — данный блок производит расчет абсолютных и удельных значений тепловой мощности и энергии; 4) расчет температурных полей — данный блок на основе данных о вводимой тепловой мощности и осадки производит расчет температурных моделей по модели симметричной одномерной конечно-разностной модели.

Модель для процесса ЛСТ была основана на конечно-разностной модели, разработанной для разнородных сплавов и описанной в [8]. Модель построена на принципе решения обратной задачи, распространенном при моделировании сварки трением [9–11]. Отличием от ранее разработанной модели был переход от сложной задачи с теплообменом относительно плоскости трения к симметричной модели, где расчет велся для одной детали из двух. Это позволило сократить размер задачи и упростить вычисления.

Для процесса ИСТ была разработана новая модель. Перед разработкой собственной модели были изучены ранее разработанные модели. Среди них имеются как аналитические, так и численные модели [12–14]. Однако главной сложностью моделирования процесса является определение коэффициента трения, зависящего от ряда параметров — скорости сварки, температуры, давления и т.д. [15]. Для инерционной сварки трением возможно решение тепловой задачи без непосредственного определения коэффициента трением [15], т.к. вся механическая энергия маховика преобразуется в тепловую энергию трения. При таком подходе важно знать изменение главных параметров процесса во времени: скорости вращения заготовок, осевого усилия сварки и укорочения деталей, что возможно на современном оборудовании, регистрирующем параметры процесса. Кроме того, проведенный обзор работ по моделированию инерционной сварки показал, что модели, не основанные на циклограммах процесса, имеют ряд допущений, ограничивающих их применение для анализа энергетических параметров [5]. Поэтому, моделирование методом конечных разностей была построена на основе циклограмм процесса.

Для сварки заготовок из одного материала была предложена симметричная одномерная явная конечно-разностная схема (рис. 3), в которой моделировался ввод и распространение тепла только в одной из заготовок, а тепловой поток представлял собой плоский источник в полубесконечном стержне, что упрощает расчет и сокращает время.

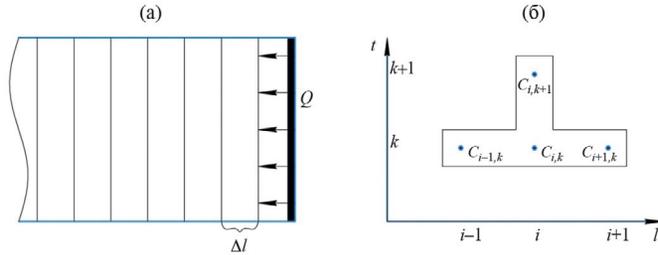


Рис. 3. Схема симметричной одномерной задачи (а) и явная конечно-разностная схема расчета (б).

Применение явной разностной схемы также сокращает время вычислений, но требует выполнения условия (1), описывающего соотношение между величиной временного и пространственного шагов

$$\tau \leq \frac{\Delta^2}{2a}, \quad (1)$$

где a — коэффициент температуропроводности, К/м; Δ — размер пространственного шага, мм; τ — размер временного шага, с.

При выполнении неравенства (1) обеспечивается сходимость расчетов.

В модели были применены следующие условия: 1) начальные условия — температура во всех элементах на первом шаге принята равной 293 К, или 20°C (комнатная температура); 2) граничные условия II рода — тепловой поток через плоскость трения. Тепловой поток определялся как изменение кинетической энергии маховика. Кинетическая энергия маховика определялась по формуле (2)

$$E_k = \frac{\omega^2 I u \eta_p \eta_n^i}{2}, \quad (2)$$

где ω — окружная скорость электродвигателя, рад/с; I — момент инерции системы, кг·м²; η_n — КПД подшипниковых пар в системе; i — количество подшипниковых пар в системе; u — передаточное число передачи; η_p — КПД передачи.

Как видно из уравнения (2), кинетическая энергия зависит от точности измерения скорости вращения электродвигателя и информации о параметрах передачи.

3) Граничные условия I рода — температура в сечении, максимально удаленном от плоскости трения. Температура в данном сечении принимается равной комнатной температуре (293 К), а размер расчетной области определяется таким образом, чтобы в крайнем сечении не наблюдалось тепловое воздействие от нагрева.

Кроме того, в модели был введен учет осадки заготовки, когда слой, принимаемый за границу трения, вытесняется в грат. При этом осуществлялось смещение источника нагрева, осаживаемый слой исключался из расчета, а из «холодной» части заготовки добавлялся новый слой с температурой, равной комнатной.

Обе разработанные модели позволяют получить достаточный набор данных для сравнения процессов между собой.

Обсуждение результатов. В результате моделирования были получены циклограммы, характеризующие процесс по следующим характеристикам: температура в стыке, вводимая тепловая мощность, коэффициент трения, величина осадки. На рис. 4 представлены циклограммы процессов ИСТ.

Как видно из циклограмм, на всех трех режимах при сварке имеется температура, при которой происходит основная осадка и на которой происходит линейное изменение коэффициента трения. В работах эта «площадка» соответствует квазистационарной или равновесной стадии [5]. Кроме того, по данным результатам можно отметить, что повышение максимальной скорости вращения или давления

приводит к повышению скорости осадки, однако большее давление снижает максимальные температуры в стыке, тогда как повышение скорость увеличивает.

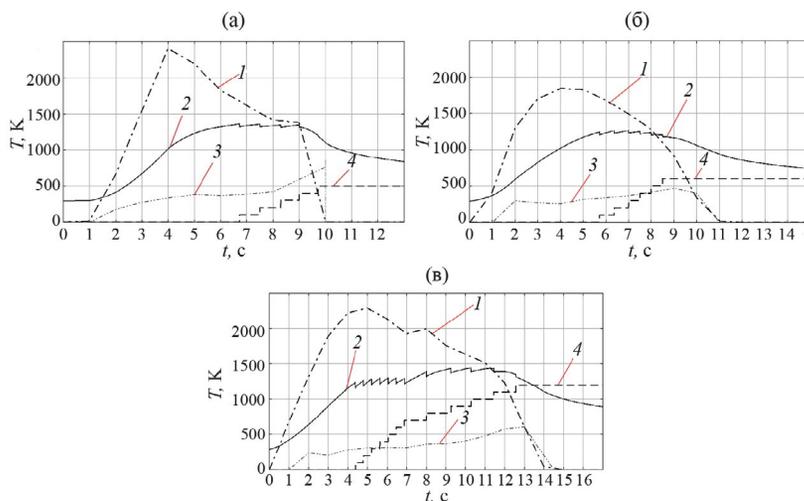


Рис. 4. Циклограммы ИСТ образцов, сваренных по режиму 1 (а), 2 (б) и 3 (в): 1 — температура в стыке, К; 2 — вводимая мощность Вт X0,1; 3 — осадка, мм X100; 4 — коэффициент трения, X1000.

Результаты моделирования процесса ЛСТ представлены на рис. 5. По данным циклограммам можно отметить, что температура в стыке, в отличие от ИСТ, продолжает расти до самой остановки. Это может говорить о том, что процесс длился недостаточно для достижения равновесной стадии.

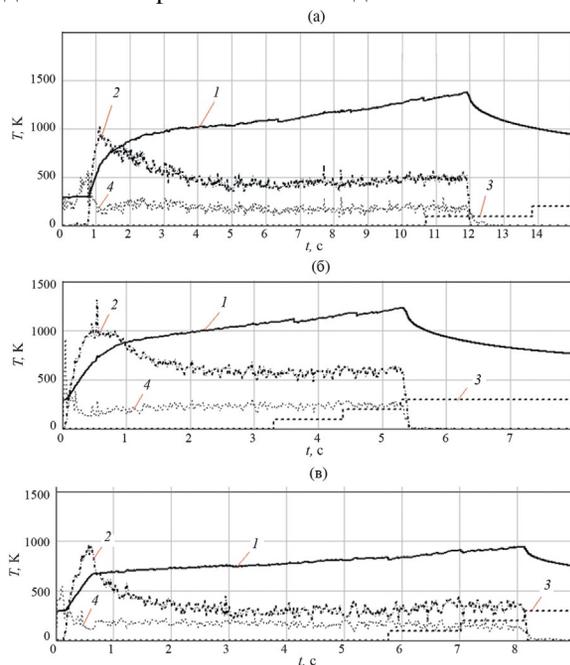


Рис. 5. Циклограммы ЛСТ образцов из сплавов ВЖ175 (а), ЭП742 (б) и ЭП741 (в): 1 — температура в стыке, К; 2 — вводимая мощность Вт X0,25; 3 — осадка, мм X100; 4 — коэффициент трения, X1000.

Также можно отметить, что коэффициент трения при ЛСТ ниже, чем при ИСТ, а вводимая тепловая мощность выше при ИСТ. Также видно, что процесс осадки идет интенсивнее при ИСТ.

Сравнение термических циклов сварки, полученных на сплавах ЭП741 и ЭП742 при близких значениях осевого давления (450 МПа при ИСТ и 440 МПа при ЛСТ) показывает, что температура при ЛСТ продолжает расти на протяжении всего цикла сварки, что может говорить о недостаточной продолжительности процесса для выхода на установившийся режим. В то же время при ИСТ, несмотря на несколько меньшие значения температуры, достигается площадка постоянной температуры, после которой идет спад, обусловленный падением вводимой тепловой мощности и торможением процесса. При этом, несмотря на схожую продолжительность времени, осадка на одну деталь в случае ЛСТ до 2.5 раз меньше (0.7 мм при ЛСТ против 1.75 мм при ИСТ).

Кроме того, было произведено сравнение некоторых характеристик процессов, приведенных в табл. 4. Из силовых характеристик наиболее предпочтительными для сравнения являются осевое давление в стыке и коэффициент трения. Кинематические характеристики наименее применимы для сравнения, т.к. именно характером движения отличаются рассматриваемые способы сварки. При этом видно, что средняя скорость движения, генерирующего трение, чуть выше для линейной сварки, а вот максимальная скорость кратно выше при инерционной сварке. Это обуславливается, в том числе, ограничениями возможностей оборудования для ЛСТ, где на скорость колебательного движения накладывается инерционная составляющая. Из всех кинематических характеристик только величина осадки каждой детали можно рассматривать как перспективный для сравнения показатель.

Таблица 4. Сравнение характеристик процессов

Параметр	ИСТ			ЛСТ		
	1	2	3	ЭП742	ВЖ175	ЭП741
Образец						
Продолжительность сварки, с	10	11	14	5.5	12	8
Давление в стыке, Мпа	400	450	400	440	440	600
Максимальная сила трения, кН	755	465	520	100	90	90
Средний коэффициент трения за цикл	0.38	0.34	0.35	0.23	0.19	0.17
Средняя скорость осадки, мм/с	0.65	0.80	1.0	0.12	0.06	0.08
Максимальная линейная скорость, м/с	2.0	2.0	2.5	1.0	0.8	0.9
Средняя скорость, м/с	0.17	0.13	0.15	0.20	0.20	0.20
Величина осадки на одну деталь, мм	1.35	1.75	5.0	0.6	0.7	0.65
Максимальная температура в стыке, К	1350	1250	1450 (1300)	1250	1350	950
Максимальная вводимая тепловая мощность, Вт	24 000	18 500	23 000	5250	4100	3800
Средняя тепловая мощность за цикл сварки, Вт	10 900	8500	12 500	2550	2000	1380
Средняя мощность, вводимая в сечение, Вт/мм ²	4.9	3.9	5.7	7.6	6.0	4.1
Введенная тепловая энергия, кДж	140	130	215	15	25	10
Тепловая энергия на выдавленный объем, Дж/мм ³	45	35	20	50	100	55

Рассмотрение энергетических характеристик выявляет несколько закономерностей. На примере трех образцов, сваренных инерционной сваркой на различных параметрах (скорость вращения и давление), видно, что при фиксации одного из двух параметров увеличение второго позволяет увеличить величину осадки, а также снижает величину тепловой энергии, приходящейся на единицу осажденного объема. Сравнение же процессов ИСТ и ЛСТ показывает следующую закономерность: удельная тепловая мощность (отношение средней за цикл тепловой мощности к площади свариваемого сечения) и тепловая энергия, отнесенная к выдавленному объему, при инерционной сварке трением заметно ниже, чем при линейной. Так, при схожем давлении (440–450 МПа) удельная тепловая мощность при ЛСТ в 1.5–2.0 раза выше, а тепловая энергия на осажденный объем в 1.5–3.0 раза выше по сравнению с данными характеристиками при ИСТ.

Заключение. 1. Разработанные модели обеспечивают возможность расчета температурных полей и характеристик сварочного цикла как для инерционной, так и для линейной сварки трением. **2.** Анализ данных показывает, что повторяемость процесса достаточно высока и все характеристики цикла при одинаковых задаваемых параметрах режима близки. Однако с увеличением площади свариваемого сечения при ИСТ повторяемость осадки снижается, что связано со скоростью протекания процесса и распределением энергии. **3.** ЛСТ и ИСТ отличаются в первую очередь характером генерирующего трение движения, что усложняет сравнение кинематических параметров. Наиболее информативным является сравнение температур, а также силовых и энергетических характеристик, отнесенных к единице свариваемого сечения, либо к единице объема выдавленного в грат металла. **4.** Повышение давления или скорости в ИСТ при фиксации второго параметра обеспечивает снижение энергетических показателей, отнесенных к единице объема выдавленного металла. **5.** Максимальная температура в стыке при ИСТ на разных режимах достигает 1350–1450 К и имеет выраженный участок, где температура поддерживается постоянной. При ЛСТ максимальная температура доходит до 1250–1350 К, однако рост температур продолжается до самой остановки. Это говорит о недостаточной длительности процесса ЛСТ для выхода на равновесную фазу, что требует большего времени трения по сравнению с ИСТ. **6.** Удельная тепловая мощность, вводимая в сечение при ЛСТ, при равном давлении превосходит значение для ИСТ на 50% и более, а затрачиваемая на осаждение единицы объема энергия до 3 раз больше по сравнению с ИСТ. Это обуславливает меньшую по величине осадку при схожей продолжительности цикла.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 234900133.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Joseph C., Thuvander M., Persson C., Hörnqvist Colliander M.* Precipitation of γ' during cooling of nickel-base superalloy Haynes 282 // *Philosophical Magazine Letters*. 2021. V. 101 (1). P. 30. <https://doi.org/10.1080/09500839.2020.1841314>
2. *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*. 2017. V. 22 (6). P. 496. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1263439>
3. *Волков А. М., Саморуков М. Л., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М.* Особенности ротационной сварки трением гранулированного жаропрочного никелевого сплава ВЖ178П // *Сварочное производство*. 2020. № 10. С. 40. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-12-1-1>

4. Саморуков М.Л., Свиридов А.В., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н. Ротационная сварка трением литых и деформируемых полуфабрикатов жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). С. 15.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23>
5. Li W., Vairis A., Preuss M., Ma T. Linear and rotary friction welding review // Materials and Manufacturing Processes. 2016. V. 61 (2). P. 71.
<https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1109214>
6. McAndrew A.R., Colegrove P.A., Bühr C. et al. A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding // Progress in Materials Science. 2018. V. 92. P. 225.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.003>
7. Tung D.J., Mahaffey D.W., Senkov O.N. et al. Transient behaviour of torque and process efficiency during inertia friction welding // Science and Technology of Welding and Joining. 2019. V. 24 (2). P. 136.
<https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1491377>
8. Medvedev A. U., Galimov V. R., Gatiyatullin I. M., Murugova O. V. Finite Difference Model of Temperature Fields in Linear Friction Welding // J. Solid State Phenomena. 2020. V. 303. P. 175.
<https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.303.175>
9. Medvedev A. U., Galimov V. R., Gatiyatullin I. M. The study of the welding relief shape influence on the linear friction welding process // IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Engin. 2021. V. 1155. P. 1.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012040>
10. McAndrew A.R., Colegrove P.A., Addison A. C. et al. Energy and force analysis of Ti-6Al-4V linear friction welds for computational modeling input and validation data // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2014. V. 45 (13). P. 6118.
<https://doi.org/10.1007/s11661-014-2575-8>
11. Bühr C., Colegrove P.A., McAndrew A.R. A computationally efficient thermal modelling approach of the linear friction welding process // J. of Materials Processing Technology. 2018. V. 252. P. 849.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.013>
12. Li W., Ma T., Li J. Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: Effects of processing parameters // Materials and Design. 2010. V. 31. P. 1497.
13. Schröder F., Ward R. M., Walpole A. R. et al. Linear friction welding of Ti6Al4V: experiments and modeling // Mater. Sci. and Technol. 2015. V. 31. P. 372.
<https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000575>
14. Wang G. L., Li J. L., Xiong J. T. et al. Study on the friction interface evolution during rotary friction welding of tube // J. of Adhesion Science and Technology. 2019. V. 33 (10). P. 1033.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1575603>
15. Maalekian M. Friction welding — critical assessment of literature // Science and Technology of Welding and Joining. 2017. V. 12 (8). P. 738.
<https://doi.org/10.1179/174329307X249333>