

А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, Е. Е. Тарасенко, Н. Ф. Измайлова, А. И. Дубин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Приведены результаты оценки распределения остаточных напряжений в сварных соединениях прямоугольного сечения из сплава ВТ6, полученные с применением метода высвобождения. Исследование показало, что при отсутствии в сварочном цикле фазы проковки напряжения растяжения в нагревавшейся свыше 600 °С области (порядка 300 МПа в продольном направлении и 200 МПа в поперечном) уравновешены напряжениями сжатия на периферии. Введение проковки в цикл сварки по-разному влияет на компоненты тензора напряжений. С ростом давления проковки напряжения, действующие вдоль меньшей стороны, снижаются, в то время как напряжения, ориентированные вдоль большего размера сечения, не меняются. *Линейная сварка трением; титановые сплавы; остаточные напряжения*

### ВВЕДЕНИЕ

Выделение тепла при трении приводит к разогреву стыка и вызывает пластическую деформацию в прогретой области. После прекращения колебательных движений металл в стыке начинает остывать. При этом в сварном шве и зоне термомеханического влияния формируются остаточные напряжения, распределение которых определяется размерами прогретых зон, скоростью остывания и величиной усилия осадки.

За последнее десятилетие было опубликовано несколько работ, в которых оценивался уровень остаточных сварочных напряжений, а также влияние параметров режима ЛСТ на характеристики распределения.

По результатам измерений [1] остаточных напряжений в соединениях сплава Ti-64 максимальный уровень растягивающих напряжений составил около 200 МПа в направлении, перпендикулярном плоскости стыка, и около 400 МПа для напряжений, действующих в плос-

кости стыка (как в направлении колебаний, так и в поперечном).

Исследования остаточных напряжений в сварных образцах сечением  $X \times Y = 13 \times 7$  мм из сплава Ti6Al4V, проведенные в [2], показали, что напряжения в направлении, перпендикулярном плоскости стыка  $\sigma_z$ , практически отсутствуют, максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  достигают 400 и 300 МПа соответственно. Увеличение давления проковки приводит к снижению всех трех измерявшихся компонентов напряжений.

Стоит отметить, что приведенные экспериментальные оценки основаны на измерении параметра кристаллической решетки  $d$  при дифракции частиц с высокой энергией. Величина напряжений в этом случае определяется при сравнении измеренной величины со значением параметра решетки в недеформированном состоянии  $d_0$ . Зона сварного стыка характеризуется ярко выраженной неоднородностью структуры и фазового состава, значения параметра  $d_0$  в ее пределах не постоянны, и для количественных оценок уровня остаточных напряжений необходимы дополнительные исследования [3], а именно сравнение имеющихся результатов с измерениями, полученными по другим методам.

Одним из методов, традиционно применяющихся для исследования остаточных сварочных напряжений, является метод высвобождения, основанный на измерении деформации после снятия напряжений при вырезании части детали.

Контактная информация: 8(347)273-08-66

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Формирование собственных напряжений при линейной сварке трением связано с термическим и силовым воздействием на фазе нагрева и проковки.

Наиболее простой формы эпюры, максимальной протяженности зоны действия растягивающих напряжений и максимального уровня растягивающих напряжений следует ожидать при полном отсутствии усилия осадки, когда остаточные напряжения образуются за счет усадки металла в стыке.

В связи с этим исследование было разбито на два этапа:

- оценка остаточных напряжений в соединениях, остывавших без приложения ковочного усилия.
- оценка влияния усилия проковки на уровень максимальных растягивающих напряжений.

Для проведения исследований были использованы образцы в форме параллелепипедов с размерами  $X \times Y \times Z = 26 \times 13 \times 35$  мм, изготовленные из сплава ВТ6. Сварка образцов выполнялась в сечении  $26 \times 13$  мм с возвратно-поступательными движениями вдоль оси  $OX$ . Используемые в эксперименте сочетания параметров различались между собой только значением усилия проковки  $P_k$ , которое принималось равным 0,25 и 50 кН. Ширина сварного шва при выбранном сочетании параметров режима составляла в среднем 1 мм.

Подготовка и исследование образцов осуществлялась в следующей последовательности:

- сварка образцов;
- механическая обработка образцов до получения размеров  $B$  и  $C$  (рис. 1);
- измерение размеров  $B$  и  $C$ ;
- разрезка образца;
- измерение размеров  $B'$  и  $C'$  высвобожденной области.

Вырезка производилась электроэрозионной резкой, а обмер – с помощью инструментального микроскопа.

Метод высвобождения позволяет определить усредненное в пределах высвобождаемого объема значение напряжений. Изменение размеров  $B$  и  $C$  после вырезки можно представить как следствие приложения фиктивных внешних сил  $P_x$  и  $P_y$  (рис. 1). При известных изменениях

размеров темплетов после вырезки, силы  $P_x$  и  $P_y$  легко могут быть найдены:

$$P_x = \frac{E \cdot \Delta B}{B} C \cdot e, P_y = \frac{E \cdot \Delta C}{C} B \cdot e, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\Delta B = B - B'$  – изменение размера  $B$  после высвобождения;  $\Delta C = C - C'$  – изменение размера  $C$  после высвобождения.

Полученные значения сил  $P_x$  и  $P_y$  связаны с распределением остаточных напряжений в вырезанном объеме интегральными соотношениями:

$$P_x = 2C \int_0^{\frac{1}{2}} \sigma_x dz, P_y = 2B \int_0^{\frac{1}{2}} \sigma_y dz. \quad (2)$$

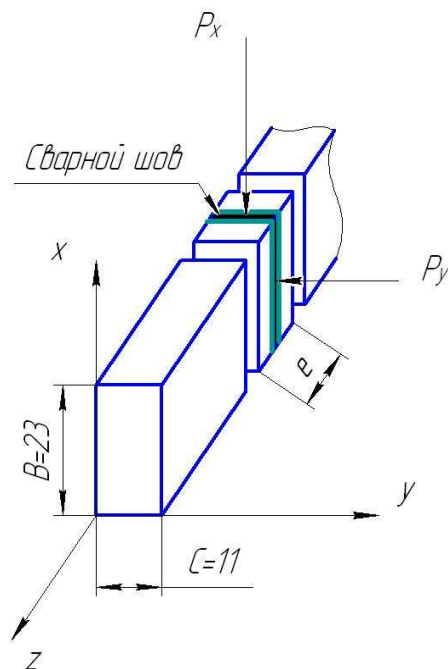


Рис. 1. Схема препарирования образца при оценке уровня ОН

Для построения эпюры собственных напряжений необходимо иметь результаты замеров образцов с разными значениями толщины высвобожденной области  $e_1, e_2 \dots e_m$ . В этом случае найденные из (1) значения  $P_1, P_2 \dots P_m$  могут быть использованы для оценки средних напряжений  $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_m$  в пределах областей  $e_1, e_2 - e_1 \dots e_k - e_{k-1}$ . Считая, что средние в пределах области  $(e_i - e_{i-1})$  напряжения равны

$$\sigma_{x(i)} = \frac{2}{e_i - e_{i-1}} \int_0^{\frac{e_i - e_{i-1}}{2}} \sigma_x dz, \sigma_{y(i)} = \frac{2}{e_i - e_{i-1}} \int_0^{\frac{e_i - e_{i-1}}{2}} \sigma_y dz$$

и, преобразуя (2), получаем уравнения для расчета напряжений  $\sigma_y(i)$  и  $\sigma_x(i)$ , которые были использованы при построении эпюр:

$$\sigma_{x(i)} = \frac{P_{x(i)} - P_{x(i-1)}}{(e_i - e_{i-1}) \cdot C}, \sigma_{y(i)} = \frac{P_{y(i)} - P_{y(i-1)}}{(e_i - e_{i-1}) \cdot B}. \quad (3)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

Результаты обработки эксперимента для образцов, сваренных без проковки, представлены в таблице, из которой видно, что укорочения темплетов шириной 1...4 мм мало различаются. Это позволило предположить, что в пределах области, удаленной на 2 мм от плоскости стыка, напряжения не изменяются, и принять для этой области усредненные значения  $\Delta B = 64,5$  мкм и  $\Delta C = 19,2$  мкм. При этом среднеквадратичное отклонение измеренных значений составило 11,6 мкм (18 % от среднеарифметического) для  $\Delta B$ , и 3,4 мкм (17,5 % от среднеарифметического) для  $\Delta C$ .

#### Результаты исследования образцов, сваренных без проковки

$e$ , мм	$\Delta B$ , мкм	$\Delta C$ , мкм	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н
1	57	21	2790	5300
1	68	16	3360	4000
1	67	20	3280	5180
2	63	22	6170	11380
2	93	23	9190	11890
3	56	23	8270	17520
3	52	16	7710	12020
3	63	16	9270	12010
4	69	21	13550	21170
4	56	14	11070	14470
8	37	8	15220	14900
8	45	2	18230	3990
8	62	20	25380	38920
12	6	7	3700	19400
12	17	20	10400	60090
12	10	7	6170	19370

Результаты расчетов распределения ОН в виде эпюр представлены на рис. 2, 3. Максимальный уровень растягивающих напряжений составил 295 МПа в продольном направлении и 210 МПа в поперечном (модуль упругости в расчетах принимался равным  $1,13 \times 10^6$  МПа). Протяженность зоны действия растягивающих напряжений  $2b_p$  составила около 8 мм.

Полученные распределения вполне соответствуют картине формирования собственных напряжений при остывании металла шва и ЗТМВ.

Сравнение эпюры  $\sigma_x$  с распределением поля температур, рассчитанных по методике [4], показало, что зона действия растягивающих напряжений соответствует области, нагревавшейся выше 500 °С, максимальные растягивающие напряжения соответствуют области, нагревавшейся выше 600 °С.

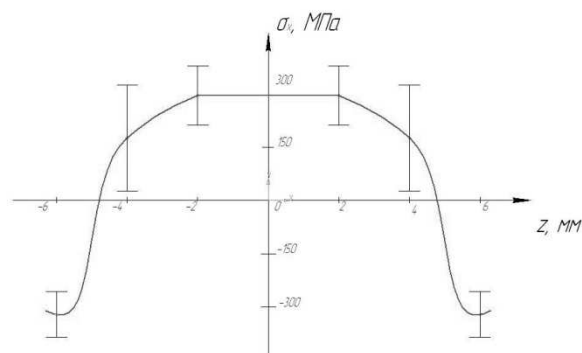


Рис. 2. Эпюра остаточных напряжений  $\sigma_x$  в соединении, сваренном без проковки

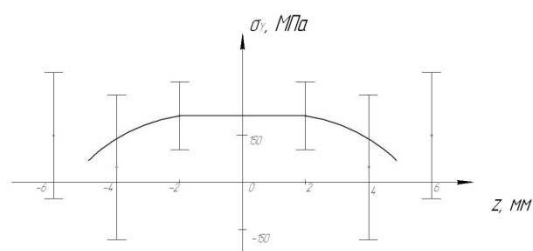


Рис. 3. Эпюра остаточных напряжений  $\sigma_y$  в соединении, сваренном без проковки

Для оценки влияния усилия проковки на уровень остаточных напряжений из образцов, сваренных с применением ковочного усилия, вырезались темплеты шириной 3 мм.

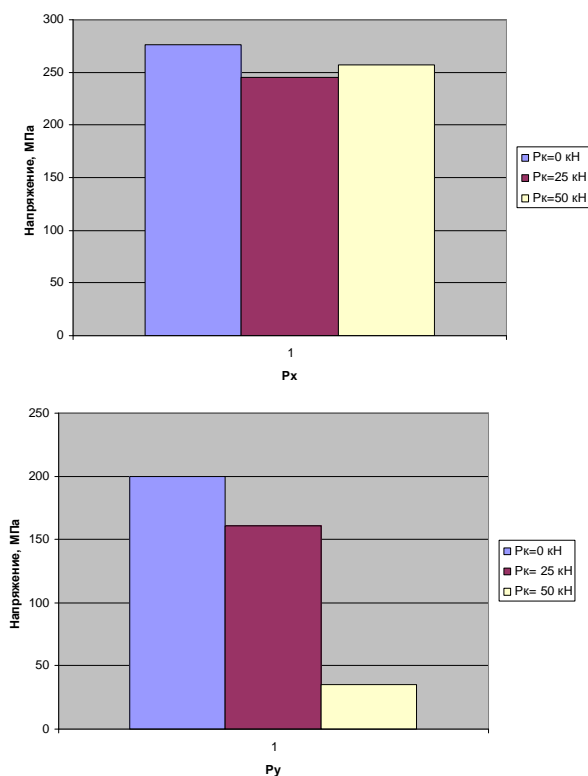
Усредненные значения  $P_x$  и  $P_y$  образцов, сваренных с различной величиной усилия проковки, в виде диаграмм приведены на рис. 4.

Как видно из диаграмм, введение в цикл сварки фазы проковки по-разному влияет на компоненты тензора остаточных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Значение  $P_x$  (а значит и  $\sigma_x$ ) в исследованном диапазоне не зависит от величины ковочного давления, в то время как  $P_y$  уменьшается в 7 раз при увеличении ковочного давления с 0 до 148 МПа. В проведенных ранее исследованиях [2] воздействие проковки было несколько иным – с увеличением давления проковки снижались оба компонента  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Такое различие вряд ли связано с применяемыми методиками или различием в принятых для сварки параметрах режима, а скорее всего, объясняется различием в размерах поперечного сечения исследованных образцов.

Снижение остаточных напряжений при проковке связано с пластической деформацией металла шва, которая достаточно свободно протекала у образцов сечением  $13 \times 7$  мм в обоих направлениях.

В нашем же случае приложенного давления осадки оказалось недостаточно для деформирования металла шва в направлении размера 26 мм.

Поскольку на практике сварочные циклы без фазы проковки не применяются, следует ожидать, что поле остаточных сварочных напряжений для каждого сварного узла будет индивидуальным. При экспериментальной оценке их распределения необходимо учитывать не только применяемые для сварки материалы и параметры режима, но также форму и размеры свариваемого сечения.



**Рис. 4.** Результаты исследования образцов сваренных с различной величиной усилия проковки

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Daymond M. R., Bonner N. W.** Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction // *Physica B-Condensed Matter*. 2003. 325 (1-4). P. 130–137.
2. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti–6Al–4V linear friction welds / J. Romeroa [et al.] // *Acta Materialia* 57 (2009). P. 5582–559.
3. Solid state joining of metals by linear friction welding: A literature review / Imran Bhamji [et al.] // *Materials Science & Technology*. 2010. Vol. 27. No. 1. P. 2–12.
4. **Медведев А. Ю., Никифоров Р. В., Супов А. В.** Определение составляющих энергетического баланса при линейной сварке трением // *Известия Самарск. науч. центра Российск. акад. наук*. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 392–395.

## ОБ АВТОРАХ

**Медведев Александр Юрьевич**, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

**Бычков Владимир Михайлович**, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дуговых и плазменных процессов в сварочном производстве.

**Тарасенко Евгений Евгеньевич**, мл. науч. сотр. той же каф. Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. напряженно-деформированного состояния деталей и элементов оснастки в процессе линейной сварки трением.

**Измайлова Наиля Федоровна**, нач. бюро ионной имплантации ОАО «УМПО». Дипл. инженер (УАИ, 1979).

**Дубин Алексей Иванович**, нач. лаб. прочности ОАО «УМПО». Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. усталостн. прочности и остаточных напряжений.