

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-54-60>

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПО КРИТЕРИЮ УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© **Константин Ефимович Пономарев¹, Илья Владимирович
Стрельников^{1*}, Алексей Алексеевич Антонов²,
Андрей Андреевич Бондаренко²**

¹ АО Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина, Россия, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, 24;
*e-mail: i.v.str@yandex.ru

² РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 65-1.

*Статья поступила 23 июля 2019 г. Поступила после доработки 22 августа 2019 г.
Принята к публикации 25 декабря 2019 г.*

При оптимизации режимов технологий, снижающих или перераспределяющих остаточные напряжения, необходимо применение современных и достоверных методов контроля. Метод лазерной интерферометрии приводит к незначительным повреждениям, которые допустимы или оперативно устраняются. Возможно применение метода в промышленных условиях, в цехах. В отличие от физических методов, имеющих ограничения для исследования ряда материалов с определенными структурой, магнитными свойствами, твердостью, метод лазерной интерферометрии обладает универсальностью. Он позволяет сохранять данные в цифровом формате на спекл-интерферограммах, что обеспечивает прослеживание этапов измерений, экспертное сравнение и достоверную отчетность. При помощи лазерной интерферометрии определяют абсолютные значения напряжения с погрешностью измерения не более 10 % от предела текучести. Все это обуславливает применение данного метода для контроля напряженного состояния при производстве ответственных сварных конструкций из алюминиевых сплавов, к которым предъявляются жесткие требования по размерной стабильности, точности и надежности. При изготовлении таких сварных конструкций возможно совмещение вибрационной обработки с процессом дуговой сварки. Данная технология, в отличие от термической обработки, имеет низкую энергоемкость, не увеличивает операционное время изготовления, экологически чиста, а также имеет достаточную эффективность. Кроме того, она позволяет значительно сократить экономические издержки на последующую механическую обработку. Метод лазерной интерферометрии дает возможность эффективно определить оптимальный технологический режим по параметру остаточных послесварочных напряжений, а также установить величину снижения данных напряжений в сравнении со случаем без проведения сопутствующей вибрационной обработки.

Ключевые слова: процесс сварки с вибрацией (СВО); вибрационная обработка; дуговая сварка; амплитуда; частота; оптимальные режимы; лазерная интерферометрия.

APPLICATION OF LASER INTERFEROMETRY TO THE CHOICE OF PROCESSING MODES BY THE CRITERION OF THE RESIDUAL STRESS LEVEL

© **Konstantin E. Ponomarev¹, Ilya V. Strelnikov^{1*},
Aleksey A. Antonov², Andrey A. Bondarenko²**

¹ AO "NPO Lavochkin", 24, ul. Leningradskaya, Khimki, 141402, Russia; * e-mail: i.v.str@yandex.ru

² Gubkin National State University of Oil and Gas, 65-1, pr. Leninskiy, Moscow, 119991, Russia.

Received July 23, 2019. Revised August 22, 2019. Accepted December 25, 2019.

Optimization of the modes of technological processing aimed at reduction or redistribution of residual stresses requires the use of modern and reliable methods of control. The method of laser interferometry leads to minor damages which are considered acceptable or can be easily removed. It is possible to use the method in industrial conditions of the workshops. Unlike physical methods, which have restrictions imposed on the classes and characteristics of materials in terms of structure, magnetic properties, and hardness, the method of laser interferometry exhibits a universal character. The method allows data saving in a digital format on speckle interferograms, thus providing a possibility of the traceability of measurement stages, expert comparison and reliable reporting. Laser interferometry provides determination of the ab-

solute values of stresses with the error of the yield point measurement below 10%. The method can be successfully used to control the stress state in the production of critical welded structures from aluminum alloys, which are subject to stringent requirements for dimensional stability, accuracy and reliability. The technology of manufacturing the above welded structures usually includes vibration treatment, combined with the arc welding process. This technology, unlike heat treatment, is rather efficient, environmentally friendly, and low energy consumption process. Optimization of the technology plays a key role in the industrial implementation and can significantly reduce the economic costs of subsequent machining. The method of laser interferometry provides effective determination of the optimal technological mode by the parameter of residual post-welding stresses, as well as determination of the degree of the reduction of those stresses compared to the case without concomitant vibration treatment.

Keywords: vibration accompanied welding process (AWP); vibration treatment; arc welding; amplitude; frequency; optimal modes; laser interferometry.

Введение

Повышение требований к размерной стабильности, точности и надежности сварных конструкций ответственного назначения особенно затрагивает отрасли ракетостроения, космической и авиационной промышленности. Это вызвано, во-первых, жесткими требованиями к массе, когда нежелательно даже увеличение припусков на послесварочную механическую обработку сопрягаемых или служебных поверхностей. Во-вторых, послесварочные остаточные деформации (ОД), как правило, ведут к необходимости термической обработки в заневоленном состоянии; количество таких обработок ограничено, основа — точная и однородная. В-третьих, нестабильность размеров и формы сварной конструкции во времени вследствие релаксационных процессов и изменения остаточных напряжений (ОН) может заставить дополнить технологический цикл операцией вылеживания, длительной по времени и потому не всегда возможной, или привести к увеличению припусков на дальнейшую механическую обработку, не гарантирующую 100 %-ную геометрическую стабильность в течение последующего времени эксплуатации. Все это обуславливает поиск и внедрение технологий, снижающих остаточные напряжения и деформации в сварных конструкциях. Одной из них является технология вибрационного старения, или вибрационной обработки. В частности, начинает широко применяться способ вибрационной обработки, совмещенной с процессом сварки (СВО). Технология СВО, кроме эффективного уменьшения и перераспределения ОД и ОН, позволяет выполнить сварной шов с плавным сопряжением с основным металлом, уменьшить количество микропор и их размеры, увеличить пластичность сварного шва — без значительного уменьшения ресурса и без удлинения операционного цикла [1 – 19]. Однако при внедрении данной технологии возникает необходимость в определении оптимальных параметров режима по критериям снижения остаточных напряжений и деформаций в сравнении со случаем без сопутствующей вибрации.

В настоящее время существует множество экспериментальных методов определения остаточных напряжений в материалах, основанных как на механическом измерении деформации при технологическом процессе изготовления или при последующей разгрузке с удалением материала, так и на регистрации изменения различных физических параметров, связанных с остаточными напряжениями. Одним из наименее трудоемких и наиболее достоверных для применения к сварным конструкциям алюминиевых сплавов в производственных условиях является метод лазерной интерферометрии (ЛИ). Он заключается в измерении деформаций в зоне разгрузки путем получения спекл-интерферограммы при поточечном вычитании изображений освещенной лазером поверхности до и после упругой разгрузки при получении зондирующего отверстия и последующем пересчете этих деформаций в напряжения с применением основных положений теории упругости. Таким образом, происходит измерение абсолютных значений остаточных напряжений с погрешностью в цену деления одной интерференционной полосы спекл-интерферограммы, что выгодно отличает данный метод от физических методов, имеющих ограничения для определенных классов материалов с точки зрения их структуры, магнитных свойств, твердости и т.д. Кроме того, в отличие от метода рентгеновской дифрактометрии, измеряющего суммарные напряжения первого и второго рода в приповерхностном слое, метод ЛИ позволяет измерять напряжения первого рода на глубинах до нескольких миллиметров. В отличие от механического измерения деформации путем наклейки тензометрических датчиков на конструкцию данным методом можно измерять ОН после их возникновения. Наконец, метод ЛИ достаточно просто использовать в производственных условиях, что особенно важно для оперативного контроля параметров технологических процессов, перераспределяющих или изменяющих уровень ОН [20 – 25].

Методы исследования

Для оценки ОН методом ЛИ был применен прибор «ДОН-5ЦЗ», имеющий одномодовый одночастотный диодный лазер с длиной волны

532 нм. Прибор оснащен цифровой видеокамерой, светодиодом подсветки, диффузором для создания равномерного светового потока, полосовым фильтром для возможности выполнения

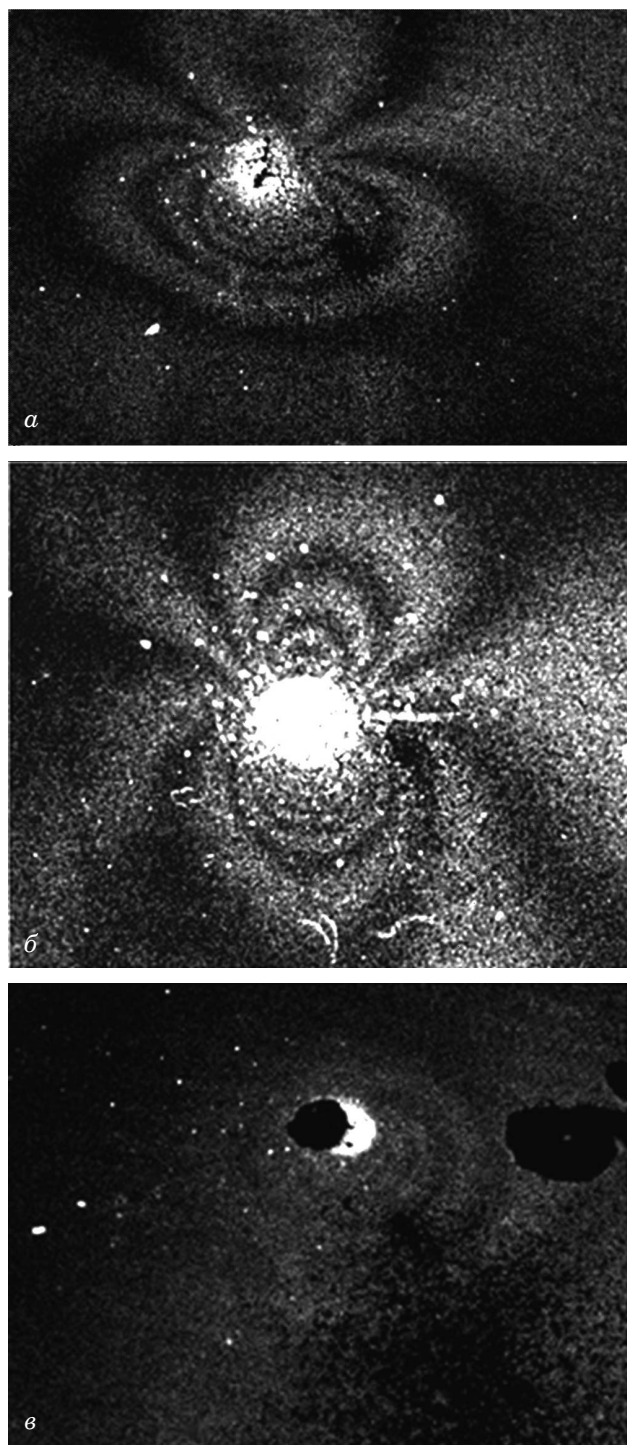


Рис. 1. Спекл-интерферограммы без СВО сплава АМг6 (образец № 10) в зонах сварного шва (а), термического влияния (б) и основного металла (в); число интерференционных полос N равно 8 (а), 6 (б) и 2 (в)

Fig. 1. The speckle interferograms without AWT of the alloy AMg6 (sample N 10) weld zone (a), heat affected zone (b), base metal zone (c); number of interference fringes $N = 8$ (a), 6(b), 2 (c)

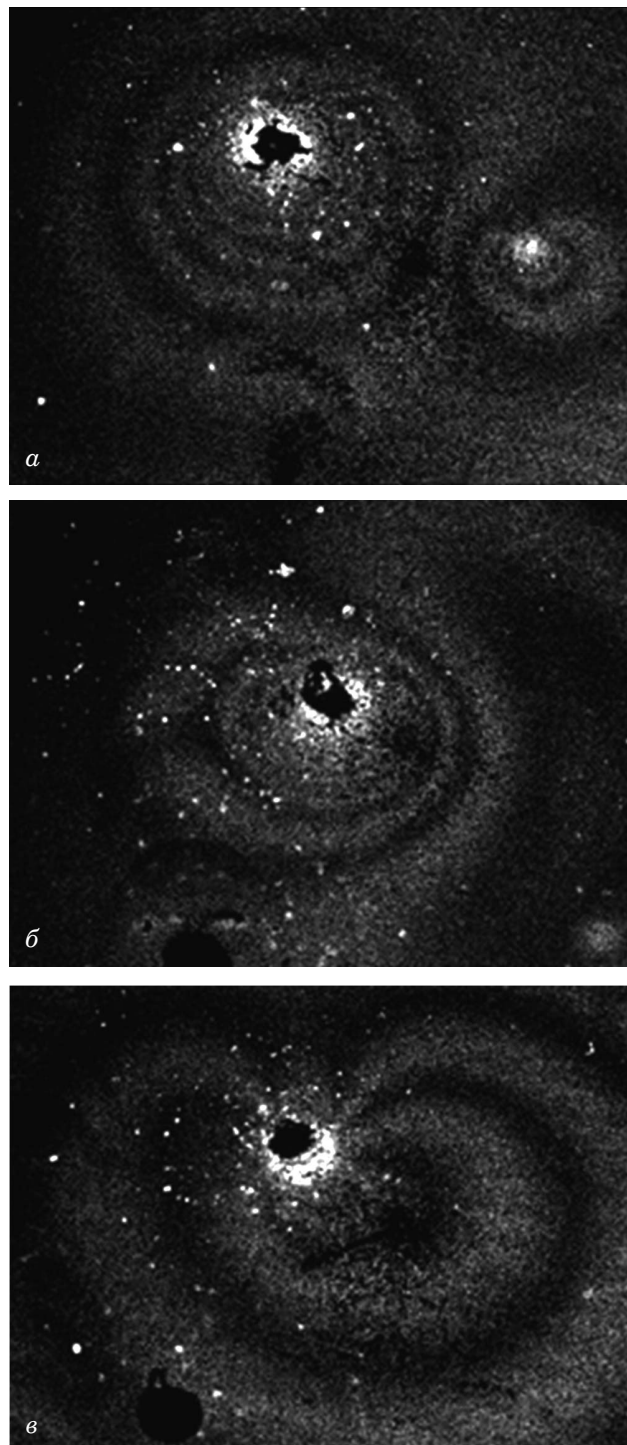


Рис. 2. Спекл-интерферограмма при СВО сплава АМг6 (образец № 7) в зонах сварного шва (а), термического влияния (б) и основного металла (в); число интерференционных полос N равно 4 (а, б) и 2 (в)

Fig. 2. Speckle-interferogram of the alloy AMg6 with AWT (sample N 7) weld zone (a), heat affected zone (b), base metal zone (c); number of interference fringes $N = 4$ (a, b), 2 (c)

работ в условиях солнечной засветки и пропускающим только световой поток облучающего поверхность лазера. В приборе предусмотрена возможность изменения угла наклона оптической плоскости интерферометра к исследуемой поверхности в диапазоне от 90 до 45° и менее, что значительно повышает точность измерений, упрощает и удешевляет процесс сверления. Для получения и обработки цифровых спекл-интерферограмм создан программно-аппаратный комплекс. Глубину и диаметр отверстия задают в пределах 1,5 – 2,5 мм и 3 – 5 мм соответственно [26 – 27]. Типичные спекл-интерферограммы, полученные в результате проведенного исследования, по зонам сварного соединения приведены на рис. 1 для пластин без СВО и на рис. 2 — для пластин со СВО. Таким образом, методом ЛИ получена информация, на базе которой выполнены эпюры распределения ОН поперек сварного шва.

В качестве образцов ответственных сварных конструкций применяли пластины из алюминиевого сплава АМг6 размером 100 × 200 × 3 мм. Сварку выполняли за один проход неплавящимся электродом в среде аргона на источнике питания «Форсаж 315», наплавку валика выполняли по центру пластины вдоль длинной стороны. Режим сварки: ток 90 А; присадочные прутки Tigrod 18.22 диам. 3,2 мм. Приспособление с образцами устанавливали на электродинамическом вибрационном стенде ВЭДС-1500МК (ООО «Виброприбор, Россия») с аппаратурой вибрационного автоматического контроля и сопровождения типа «Базис-001» (ООО «Измеритель», Россия). Сварку с вибрацией проводили с вертикальным направлением колебаний при всех сочетаниях параметров амплитуды и частоты. Амплитуды колебаний составляли ±0,1 (размах 0,2), ±0,2 (размах 0,4), ±0,3 (размах 0,6 мм); частоты — 40, 50, 60 Гц. Режимы СВО, соответствующие номерам образцов, приведены в табл. 1.

В процессе эксперимента измеряли также остаточную деформацию пластин по стреле прогиба.

Обсуждение результатов

В табл. 2 приведены значения ОН пластин как при различных режимах СВО, так и без вибрационной обработки расстояния точек от сварного шва, а также их пиковые значения. Видно, что максимальные значения остаточных напряжений располагаются вблизи сварного шва (образцы № 6 – 10). Малое число измерений несколько снижало достоверность исследований, поскольку, во-первых, пиковое значение эпюры напряжений можно пропустить, во-вторых, — замер сделать в точке, испытавшей влияние следующего участка сварного шва ввиду «точечного» характера ручной аргонодуговой сварки (образцы № 1 – 3). Например, для образца № 8 значения ОН в точках, расположенных практически на шве, имеют значительный разброс: 68 МПа —

Таблица 1. Номера образцов, соответствующие различным режимам сварки с вибрацией и без нее

Table 1. The number sample corresponding to different welding modes with and without AWT

№ образца	Частота, Гц	Амплитуда, мм
1	40	±0,1
2	40	±0,2
3	40	±0,3
4	50	±0,1
5	50	±0,2
6	50	±0,3
7	60	±0,1
8	60	±0,2
9	60	±0,3
10	Без вибрации	

Таблица 2. Остаточные напряжения при различных режимах СВО и без вибрации

Table 2. Residual stresses for different modes with and without AWT

№ образца	ОН, МПа/Расстояния от шва, мм	Пиковые значения
1	36/–8; 35/2; 30/13	36/–8
2	68/1; 34/10; 19/–6	68/1
3	30/–5; 27/0; 17/9	30/–5
4	47/0; 46/15; 45/–7; 42/–6; 39/0; 34/0	47/0
5	45/1; 37/1; 28/11; 27/8; 27/0; 27/–14; 10/–8	45/1
6	71/7; 43/–10; 40/15; 27/–2; 27/–9	71/7
7	56/2; 45/–9; 45/39; 40/0; 22/10; 19/–15; 19/–12	56/2
8	68/1; 37/–13; 34/8; 34/2; 30/–1; 22/–15; 20/1; 20/1; 19/–1; 10/14	68/1
9	54/2; 36/–7; 34/–4; 34/–8; 30/7; 28/–9; 27/2; 27/10; 18/8; 18/1; 17/1	54/2
10	100/0; 71/9; 65/16; 63/9; 40/–29; 37/–2	100/0

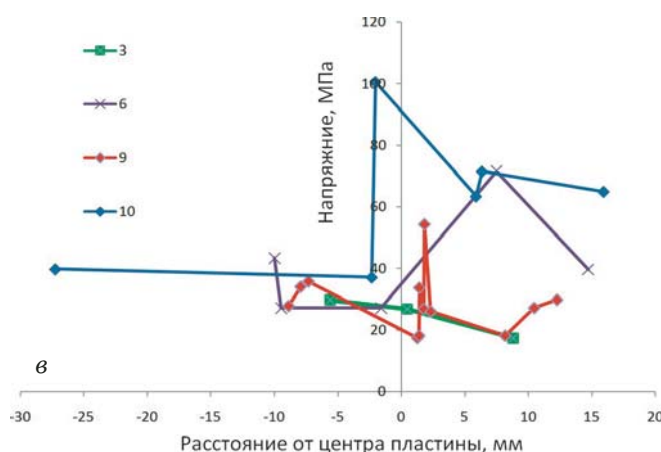
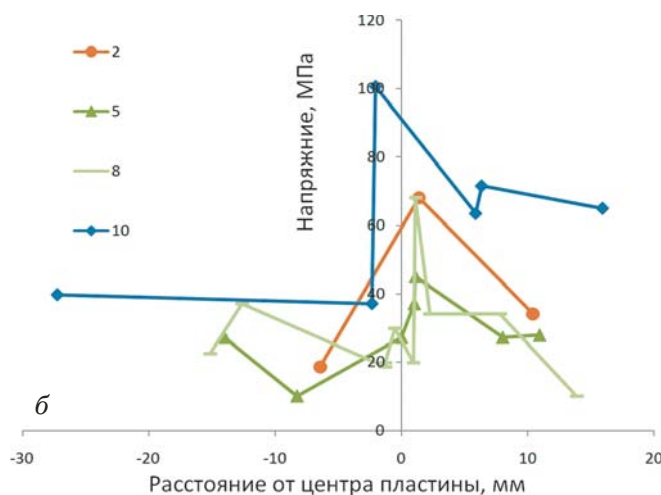
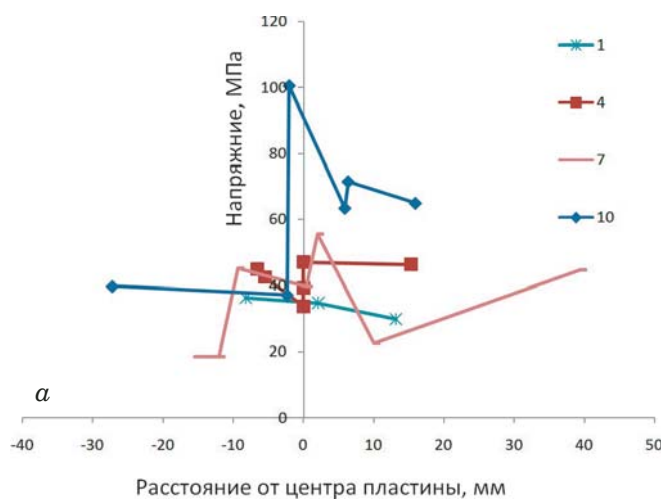


Рис. 3. Семейство эпюр остаточных напряжений с одинаковыми амплитудами при сварке с ВО, а также без нее (образец № 10): а — $A = \pm 0,1$ мм (образцы № 1, 4, 7); б — $A = \pm 0,2$ мм (образцы № 2, 5, 8); в — $A = \pm 0,3$ мм (образцы № 3, 6, 9)

Fig. 3. Family of the distribution diagrams for residual stresses of the same amplitudes with and without AWT (sample N 10): а — $A = \pm 0.1$ mm (samples N 1, 4, 7); б — $A = \pm 0.2$ mm (samples N 2, 5, 8); в — $A = \pm 0.3$ mm (samples N 3, 6, 9)

на 1 мм; 34 МПа — на 2 мм; 30 МПа — на -1 мм; 20 МПа — на 1 мм; при этом ряд замеров был

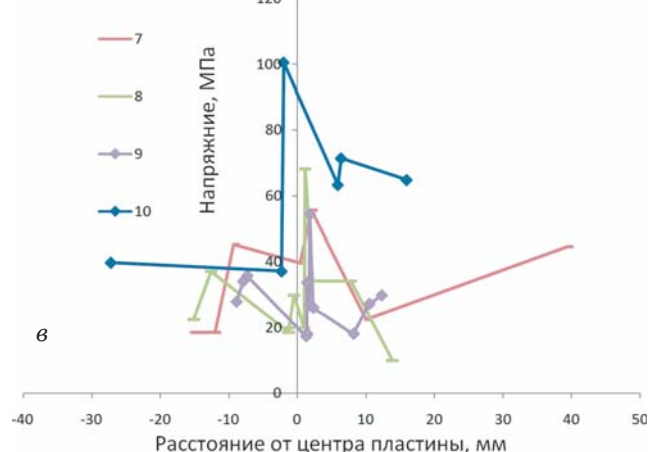
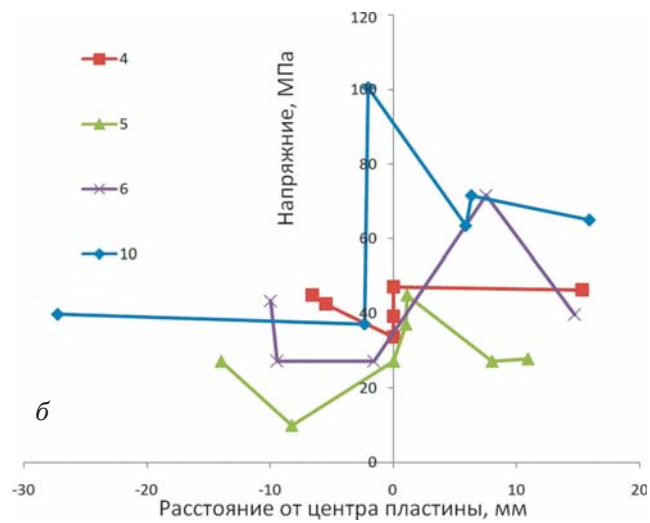
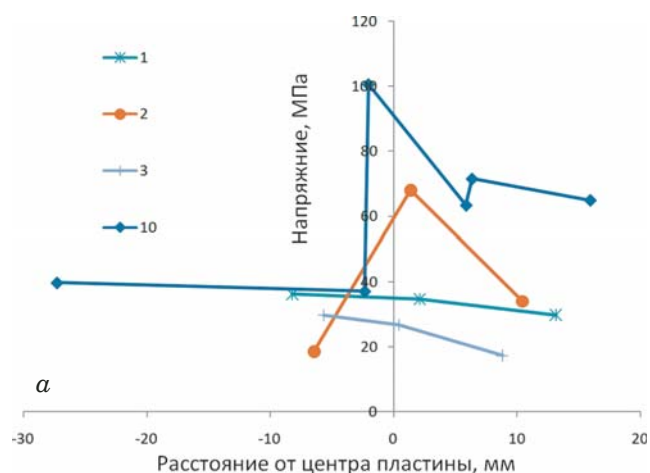


Рис. 4. Семейство эпюр остаточных напряжений с одинаковыми частотами при сварке с ВО, а также без нее (образец № 10): а — $\nu = 40$ Гц (образцы № 1, 2, 3); б — $\nu = 50$ Гц (образцы № 4, 5, 6); в — $\nu = 60$ Гц (образцы № 7, 8, 9)

Fig. 4. Family of the distribution diagrams for residual stresses of the same frequency with and without AWT (sample N 10): а — $\nu = 40$ Hz (samples N 1, 2, 3); б — $\nu = 50$ Hz (samples N 4, 5, 6); в — $\nu = 60$ Hz (samples N 7, 8, 9)

сделан в точках, напряжения в которых были сняты влиянием следующей сварочной точки. Однако можно заметить, что значение пиковых

ОН при сварке с вибрацией (40 – 70 МПа) несколько ниже, чем в случае традиционной сварки (100 МПа). Кроме того, ОН в околосшовной зоне при сварке без вибрации (63, 65, 71 МПа) также превышают ОН при сварке с вибрацией (28, 34, 46 МПа, и т.д.).

На рис. 3 и 4 показаны семейства эпюр ОН для одинаковых амплитуд и одинаковых частот. Для сравнения уровней ОН для каждого семейства приведены эпюры, полученные при выполнении сварки без вибраций. В ряде случаев центр пластин образца не совпадал с центром сварного шва, например, для образца № 6 отклонение составило 6 – 8 мм, что объясняется ручным выполнением работ. Из рис. 3 и 4 следует, что эпюра ОН при сварке без ВО (образец № 10) с учетом погрешности метода голографической интерферометрии в одну полосу, погрешности из-за дискретного измерения и возможного пропуска пика близко подходит к пределу текучести алюминиевого сплава АМг6, который согласно ГОСТ 21631–76 для листов в отожженном состоянии составляет 155 МПа. Контур эпюры образца № 10 соответствует характерной эпюре сварного соединения материала без полиморфного превращения и имеет колоколоподобный вид. Семейства эпюр одинаковых частот четче выявляют влияние изменения второго параметра на уровень ОН. Однако заметно, что рост как амплитуды, так и частоты приводит к снижению и пиковых значений, и общего уровня ОН.

Ниже приведены остаточные деформации пластин при различных режимах сварки с ВО и без нее, измеренные по стреле прогиба.

Номер образца	Деформация, мм
1.	1,4
2.	1,2
3.	0,4
4.	0,4
5.	0,4
6.	0,2
7.	0,0
8.	0,5
9.	0,1
10.	1,3

Можно заключить, что ОД при СВО в целом заметно ниже. ОД образцов № 1 и № 2 с «мягкими» режимами с относительно небольшой вводимой механической энергией колебаний сопоставимы с ОД образцов № 10. Результаты измерений также показывают, что на величину ОД сильное влияние оказывает частота; при низких частотах повышается влияние амплитуды.

Проведенные исследования наметили пути оптимизации параметров режима СВО при изготовлении сварных конструкций из алюминиевого сплава АМг6.

Выводы

Методом лазерной интерферометрии получены достоверные результаты исследования напряженного состояния образцов из алюминиевого сплава АМг6.

Подобраны оптимальные режимы вибрационной обработки и сопутствующей аргонодуговой сварки пластин из исследуемого сплава.

Показано, что проведение вибрационной обработки снижает уровень остаточных сварочных напряжений как в пиковых областях, так и в околосшовной зоне до 40 – 60 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shaikh S. N.** Vibratory Residual Stress Relieving — A Review / Journal of Mechanical & Civil Engineering. 2016. N 3. P. 01 – 04.
2. **Пonomarev К. Е., Стрельников И. В.** К вопросу применения вибрационной обработки сварных конструкций космических аппаратов для повышения точности и размерной стабильности. Обзор / Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 4(38). С. 89 – 95.
3. **Sedec P.** Vibration treatment-effective method of improving the dimensional stability of welded structures: investigation and practice / Welding and Surfacing. 1997. Vol. 8. P. 221 – 228.
4. **Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A.** Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds / Science and Technology of Welding & Joining. 2015. August. P. 45 – 49.
5. **Govindarao P. et al.** Affect of Vibratory Welding Process to Improve the Mechanical Properties of Butt Welded Joints / International Journal of Modern Engineering Research. 2012. Vol. 2. Issue 4. P. 2766 – 2770.
6. **Ризванов Р. Г., Файрушин А. М., Каретников Д. В.** Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений / Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 337 – 342.
7. **Жданов И. М., Дыхно С. Л. и др.** Релаксация напряжений в тонколистовых сварных соединениях сплава АМг6 / Автоматическая сварка. 1986. № 4. С. 35 – 38.
8. **Колесников Я. А., Ризванов Р. Г., Файрушин А. М.** Влияние направления приложения вибрационного воздействия в процессе сварки на поле остаточных напряжений в стыковом сварном соединении / Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 72 – 74.
9. **Ризванов Р. Г., Файрушин А. М., Каретников Д. В.** Исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений труб из жаропрочной стали 15Х5М / Нефтегазовое дело. 2013. № 1. С. 369 – 382.
10. **Сагалевиц В. М.** Устранение сварочных деформаций в машиностроительных конструкциях. — М.: НИИИнформтяжмаш, 1969. — 79 с.
11. **Jaskirat Singh, Gaurav Kumar, Narayan Garg.** Influence of vibrations in arc welding over mechanical properties and microstructure of butt-welded-joints / International Journal of Science & Technology. 2012. Vol. 2. Issue 1. February. P. 1 – 6.
12. **Balasubramanian K., Raghavendran S., Balusamy V.** Studies on the effect of mechanical vibration on the microstructure of the weld metal / International journal of technology and engineering systems. 2011. Vol. 2(3). P. 253 – 256.
13. **Лащенко Г. И.** Комбинированные технологии послесварочной обработки металлоконструкций / Сварщик. 2007. № 1. С. 14 – 18.
14. **Лащенко Г. И.** Технологические возможности вибрационной обработки: обзор / Автоматическая сварка. 2016. № 7. С. 28 – 34.
15. **Jurcius A., Valiulis A. V., Černašėjus O., et al.** Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and

- mechanical properties of structural steel joint / *Journal of Vibroengineering*. 2010. Vol. 12. N 1. P. 133 – 141.
16. **Habel T. E.** Successful stress relief of welds using sub-harmonic energy / *Welding Journal*. 2001. Vol. 80(1). P. 38 – 42.
 17. **Ebrahimi S. M., Farahani M., Akbari D.** The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection / *Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102(4). P. 1 – 12.
 18. **Стрельников И. В.** Влияние сопутствующей вибрационной обработки на остаточную деформацию и геометрию сварных соединений переменной жесткости / *Сварка и Диагностика*. 2018. № 3 С. 24 – 29.
 19. **Cai G., Huang Yu., Huang Yi.** Operating principle of vibratory stress relief device using coupled lateral-torsional resonance / *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. N 6. P. 143 – 147.
 20. **Пономарев К. Е., Стрельников И. В.** К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях / *Сварка и Диагностика*. 2018. № 2. С. 29 – 34.
 21. **Sarga P., Menda F.** Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses / *American journal of mechanical engineering*. 2013. N 1. P. 335 – 338.
 22. **Barsanti M., Beghini M., Santus C., Benincasa A., Bertelli L.** Integral method coefficients and regularization procedure for the ring-core residual stress measurement technique / *Advanced materials research*. 2014. N 996. P. 331 – 336.
 23. **Краус И., Трофимов В. В.** Метод рентгеновской тензометрии в технической диагностике металлических изделий / *Современное машиностроение*, 2011. № 1. С. 273 – 279.
 24. **Ganguly S., Fitzpatrick M. E., Edwards L.** Use of neutron and synchrotron X-ray diffraction for evaluation of residual stresses in 2024-T351 aluminum alloy variable polarity plasma-arcweld / *Metallurgical and materials transactions*. 2006. N 37(2). P. 411 – 420.
 25. **Withers P. J., Bhadeshia H. K.** Residual stress. Part 1. Measurement techniques (Overview) / *Materials Science and Technology*. 2001. N 17. P. 355 – 365.
 26. **Антонов А. А., Капустин О. Е.** Оптико-электронный интерферометр для измерения остаточных напряжений / *Технология машиностроения*. 2008. № 3. С. 45 – 52.
 27. **Антонов А. А.** Исследование полей остаточных напряжений в сварных конструкциях / *Сварочное производство*. 2013. № 12. С. 13 – 17.
- welding process on the field of residual stresses in the butt weld / *Neftegazovoe delo*. 2006. P. 72 – 74 [in Russian].
9. **Rizvanov R. G., Fairushin A. M., Karetnikov D. V.** Research of influence of vibration treatment on mechanical properties and crack resistance of welded joints of pipes from heat resistant steel 15Kh5M / *Neftegazovoe delo*. 2013. N 1. P. 369 – 382 [in Russian].
 10. **Sagalevich V. M.** Elimination of welding deformations in engineering structures. — Moscow: NIInformtyagmash, 1969. — 79 p. [in Russian].
 11. **Jaskirat Singh, Gaurav Kumar, Narayan Garg.** Influence of vibrations in arc welding over mechanical properties and microstructure of butt-welded-joints / *International Journal of Science & Technology*. 2012. Vol. 2. Issue 1. February. P. 1 – 6.
 12. **Balasubramanian K., Raghavendran S., Balusamy V.** Studies on the effect of mechanical vibration on the microstructure of the weld metal / *International journal of technology and engineering systems*. 2011. Vol. 2(3). P. 253 – 256.
 13. **Lashchenko G. I.** Combined technologies of post-welding treatment of metal structures / *Svarshik*. 2007. N 1. P. 14 – 18 [in Russian].
 14. **Lashchenko G. I.** Technological possibilities of vibration treatment: review / *Avtomat. Svarka*. 2016. N 7. P. 28 – 34 [in Russian].
 15. **Jurcius A., Valiulis A. V., Černašėjus O., et al.** Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and mechanical properties of structural steel joint / *Journal of Vibroengineering*. 2010. Vol. 12. N 1. P. 133 – 141.
 16. **Habel T. E.** Successful stress relief of welds using sub-harmonic energy / *Welding Journal*. 2001. Vol. 80(1). P. 38 – 42.
 17. **Ebrahimi S. M., Farahani M., Akbari D.** The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection / *Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102(4). P. 1 – 12.
 18. **Strelnikov I. V.** The influence of accompanying vibrating processing on residual strain and geometry of welded joints of variable rigidity / *Svarka i diagnostika*. 2018. N 3. P. 24 – 29 [in Russian].
 19. **Cai G., Huang Yu., Huang Yi.** Operating principle of vibratory stress relief device using coupled lateral-torsional resonance / *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. N 6. P. 143 – 147.
 20. **Ponomaryov K. E., Strelnikov I. V.** On the choice of an experimental method for estimating residual stresses in welded structures / *Svarka i diagnostika*. 2018. N 2. P. 29 – 34 [in Russian].
 21. **Sarga P., Menda F.** Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses / *American journal of mechanical engineering*. 2013. N 1. P. 335 – 338.
 22. **Barsanti M., Beghini M., Santus C., Benincasa A., Bertelli L.** Integral method coefficients and regularization procedure for the ring-core residual stress measurement technique / *Advanced materials research*. 2014. N 996. P. 331 – 336.
 23. **Kraus I., Trofimov V. V.** Method of x-ray tensometry in technical diagnostics of metal products / *Sovr. Mashinost.* 2011. N 1. P. 273 – 279 [in Russian].
 24. **Ganguly S., Fitzpatrick M. E., Edwards L.** Use of neutron and synchrotron X-ray diffraction for evaluation of residual stresses in 2024-T351 aluminum alloy variable polarity plasma-arcweld / *Metallurgical and materials transactions*. 2006. N 37(2). P. 411 – 420.
 25. **Withers P. J., Bhadeshia H. K.** Residual stress. Part 1. Measurement techniques (Overview) / *Materials Science and Technology*. 2001. N 17. P. 355 – 365.
 26. **Antonov A. A., Kapustin O. E.** Opto-electronic interferometer for residual stress measurement / *Tekhnol. Mashinost.* 2008. N 3. P. 45 – 52 [in Russian].
 27. **Antonov A. A.** Investigation of residual stress fields in welded structures / *Svarochnoe proizvodstvo*. 2013. N 12. P. 13 – 17 [in Russian].

REFERENCES