

УДК 621.791

doi:10.21685/2072-3059-2022-2-9

Совершенствование процесса послойной лазерной сварки металлических деталей за счет управления остаточными напряжениями

Т. Н. Иванова¹, А. Ю. Муйземнек²

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

¹Чайковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», Чайковский, Россия

²Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹rsg078829@mail.ru, ²muyzemnek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Послойная лазерная сварка металлических деталей позволяет получить сварной шов послойно. В результате разогрева поверхности резко возрастают термические напряжения, вызванные нестационарным температурным полем. Цель исследования заключается в совершенствовании процесса послойной лазерной сварки металлических деталей за счет управления остаточными напряжениями с помощью получения прототипа изделия на 3D-принтере. Совмещение технологии быстрого прототипирования с 3D-сканирующим модулем и прогнозирование остаточных напряжений цифровыми технологиями позволяют оперативно вносить изменения в трехмерную компьютерную модель или прокладывать оптимальный путь лазерного луча, анализировать напряженно-деформированное состояние деталей-прототипов, сокращая финансовые затраты при производстве. *Материалы и методы.* Используются аналитические и компьютерные методы исследования температурных напряжений в плоских металлических деталях, построены цифровые модели распределения остаточных напряжений по поверхности и по глубине детали. Результаты проверены экспериментально металлографическими опытно-промышленными исследованиями. *Результаты.* Максимальная нагрузка от термических напряжений при циклическом нагреве приходится на поверхностный слой детали, амплитуда колебаний в глубинных слоях ниже амплитуды колебаний напряжений на поверхности. Чем выше интенсивность теплообмена, тем быстрее деталь разрушится от усталости, тем меньше должно быть значение амплитуды колебания температуры среды, при которой происходит приспособляемость детали к заданному циклу теплового нагружения. Долговечность детали зависит от частоты колебаний температуры. *Выводы.* При послойной лазерной сварке нагрев металлических деталей лазером может проходить по синусоидальному, прямоугольному, пилообразному циклам с одинаковой длительностью периода охлаждения и периода нагрева. Пределы изменения термических напряжений на поверхности детали существенно зависят от конкретного вида температурного цикла среды. Максимальное значение амплитуды термических напряжений и минимальное значение приспособляющих температурных нагрузок возникает при прямоугольном цикле, минимальные термические напряжения – при пилообразном. При несимметричном периодическом нагреве детали амплитуда колебаний термических напряжений на поверхности $x = R$ не зависит от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ и имеет место лишь при небольших значениях $\omega R^2/a$. При большом значении $\omega R^2/a$ зависимость амплитуды температурных напряжений на поверхности $x = R$ от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ отсутствует. Проведенные опытно-промышленные испытания показали, что аддитивная послойная технология сварки лазерным лучом стального листа и анализ металло-

графический структуры металла согласуются с полученными данными изменения напряжений по сечению детали. Это подтверждает точность проведения теоретического и цифрового экспериментов. Технологию можно использовать в стационарных и передвижных мобильных установках.

Ключевые слова: послойная лазерная сварка, сварной шов, термические напряжения, нестационарное температурное поле, быстрое прототипирование, компьютерная модель, металлографический анализ

Для цитирования: Иванова Т. Н., Муйземнек А. Ю. Совершенствование процесса послойной лазерной сварки металлических деталей за счет управления остаточными напряжениями // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 104–116. doi:10.21685/2072-3059-2022-2-9

Improving the process of layerwise laser welding of metal parts by controlling residual stresses

T.N. Ivanova¹, A.Yu. Muiyemnek²

¹Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

¹Tchaikovsky branch of the Perm State Polytechnic University, Tchaikovsky, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

¹rsg078829@mail.ru, ²muiyemnek@yandex.ru

Abstract. Background. Layerwise laser welding of metal parts allows you to get a weld in layers. As a result of the heating of the surface, thermal stresses sharply increase, caused by a non-stationary temperature field. The purpose of the study is to improve the process of layerwise laser welding of metal parts by controlling residual stresses by obtaining a product prototype on a 3D printer. The combination of rapid prototyping technology with a 3D scanning module and the prediction of residual stresses by digital technologies allow you to quickly make changes to a 3D computer model or lay the optimal path for a laser beam, analyze the stress-strain state of prototype parts, reducing financial costs in production. **Materials and methods.** Analytical and computer methods for studying thermal stresses in flat metal parts are used, digital models of the distribution of residual stresses over the surface and depth of the part are built. The results are verified experimentally by metallographic pilot studies. **Results.** The maximum load from thermal stresses during cyclic heating falls on the surface layer of the part, the amplitude of fluctuations in the deep layers is lower than the amplitude of stress fluctuations on the surface. The higher the intensity of heat transfer, the faster the part will collapse from fatigue, the smaller should be the value of the amplitude of fluctuations in the temperature of the medium, at which the part adapts to a given thermal loading cycle. The durability of the part depends on the frequency of temperature fluctuations. **Conclusions.** During the simulation, it was revealed that the additive mechanics of the laser can go through sinusoidal, rectangular, sawtooth cycles with the same duration of the cooling period and the heating period. The limits of change in thermal stresses on the surface of the part depend significantly on the specific type of temperature cycle of the medium. The maximum value of the amplitude of thermal stresses and the minimum value of the adaptive thermal loads occurs with a rectangular cycle. Moreover, vice versa, the minimum thermal stresses - with a sawtooth. With asymmetric periodic heating of the part, the amplitude of fluctuations of thermal stresses on the surface $x = R$ does not depend on the intensity of heat transfer on the surface $x = 0$ and takes place only at small values of $\omega R^2/a$. For a large value of $\omega R^2/a$, there is no dependence of the amplitude of thermal stresses on the surface $x = R$ on the intensity of heat transfer on the surface $x = 0$. The conducted pilot tests have shown that the additive layer-by-layer technology for welding a steel sheet with a laser beam and the analysis of the metallographic structure of the

metal are consistent with the obtained data on the change in stresses over the section of the part. This confirms the accuracy of the theoretical and digital experiments. The technology can be used in stationary and mobile installations.

Keywords: layerwise laser welding, weld seam, thermal stresses, non-stationary temperature field, rapid prototyping, computer model, metallographic analysis

For citation: Ivanova T.N., Muzyemnek A.Yu. Improving the process of layerwise laser welding of metal parts by controlling residual stresses. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(2):104–116. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-2-9

Введение

Послойная лазерная сварка представляет собой процесс плавления соединяемых деталей с формированием зон термического влияния металла шва. Существующие пути лазерного луча:

1) когда движущийся пучок высокой плотности и мощности испаряет металл в точке взаимодействия, создавая глубокую полость цилиндрической формы вдоль шва;

2) когда луч низкой интенсивности расфокусирован и образует круглый шов большей ширины в поперечном сечении на поверхности, чем в глубине проплавления, распределяют тепло в первом случае в двумерных координатах, во втором – трехмерных.

Перемещения лазерного луча относительно поверхности во время обработки могут быть:

– при неподвижной детали, подвижном лазерном луче. В этом случае путь луча фиксированный, настройки в процессе обработки единичные;

– при неподвижном лазере перемещается деталь. Тогда настройки не требуются, в процессе обработки изменений в механике луча нет, но необходимы жесткие крепежные приспособления;

– при неподвижном источнике лазера или генераторе луча перемещается оптоволоконный лазер или плавающая оптика, деталь неподвижна. Путь луча фиксированный с корректировкой или настройкой геометрии луча.

Отличие аддитивных технологий заключается в возможности управления структурой изделий слой за слоем с контролем условий плавления и кристаллизации расплава и параметров, которые оказывают влияние на температурный градиент, скорость и направление теплоотвода, энергию лазерного излучения, размер пятна, толщину слоя [1–3].

Вопреки известным преимуществам данной технологии [2], свариваемые детали подвержены остаточным напряжениям и имеют проблемы с искажениями, влияющими на работоспособность и герметичность. Причина этого – неравномерное температурное поле, испытываемое деталью.

1. Постановка задач

Моделирование процесса послойной лазерной сварки металлических деталей позволяет получить прототип твердотельного изделия с помощью 3D-принтера и спрогнозировать, рассчитать, проверить и варьировать остаточные напряжения цифровыми технологиями. Совмещение технологии быстрого прототипирования с 3D-сканирующим модулем [4] и прогнозирование остаточных напряжений цифровыми технологиями позволяют оперативно вносить изменения в трехмерную компьютерную модель или прокла-

дывать оптимальный путь лазерного луча, анализировать напряженно-деформированное состояние деталей-прототипов, сокращая финансовые затраты при производстве. Для повышения качества формируемой поверхности, снижения длительности процессов прототипирования и производства разработана компьютерная модель прохождения луча большой мощности при послойном проходе с образованием наложения слоев (рис. 1).

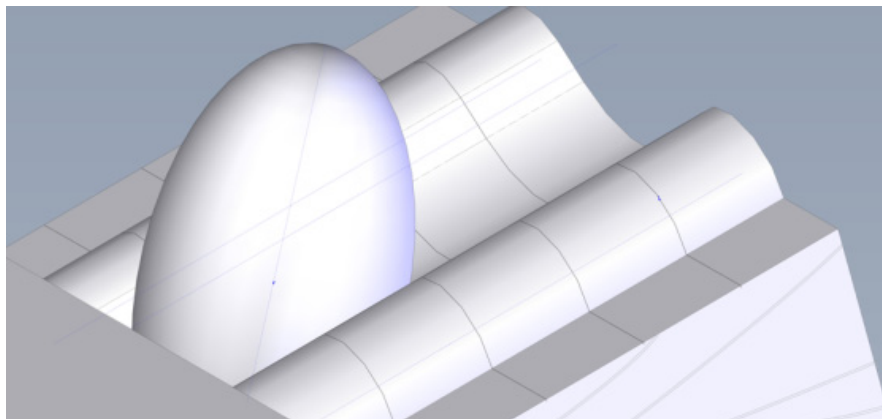


Рис. 1. Компьютерная модель прохождения луча при послойном наложении слоев

При моделировании выявлено, что послойная лазерная сварка металлических деталей может проходить по синусоидальному, прямоугольному, пилообразному циклам с одинаковой длительностью периода охлаждения и периода нагрева.

В процессе сварки мгновенная температура контакта поверхности детали достигает $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, резко снижаясь после прохождения лазерного луча на $120\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем окончательно на $300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение температуры поверхности детали вызывает термические напряжения в период действия луча и фазовые напряжения в период быстрого охлаждения. Суммируясь с напряжениями от действующих нагрузок, термические напряжения могут превысить предел прочности отдельных микрообъемов и привести к трещинам.

В деталях, циклически изменяющих свое температурное поле, возникает и циклически изменяющееся во времени поле термических напряжений. До тех пор, пока термические напряжения вызывают только упругие деформации, деталь может работать любое количество циклов без разрушения несущей способности. Если циклические тепловые воздействия вызывают упругопластические деформации, то возможны явления:

- пластические деформации неограниченно возрастают с течением времени, деталь разрушается;
- пластические деформации циклически изменяются с ограничением по величине. Деталь разрушается от усталости;
- деталь приспособляется, если появляются остаточные напряжения без пластических деформаций.

2. Теоретические исследования

Если рассмотреть пластину толщиной $2R$ и постоянную по объему исходную температуру t_0 , в начальный момент времени она подвергается сим-

метричному периодическому воздействию луча по гармоническому закону. Согласно принципу Сен-Венана безразмерные значения амплитуды температурных напряжений для квазистационарных термо-упругих напряжений на поверхности детали будут иметь зависимость

$$\frac{\sigma_{y(1-v)}}{\alpha E t_m} = \Phi \left(\frac{R \alpha_m}{\lambda}, \frac{\omega R^2}{a}, \frac{x}{R} \right), \quad (1)$$

где x – координата, м ($-R \leq x \leq R$); R – размер тела; x/R – безразмерная координата; $\omega R^2/a$ – комплекс, характеризующий циклическое инерционное время запаздывания начала процесса нагрева лазера по сравнению с началом процесса нагрева поверхности; a – коэффициент температуропроводности материала, характеризующий его теплоинерционные свойства, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, представляющий собой удельный тепловой поток, проходящий через изотермическую поверхность при единичном градиенте температуры, Вт/(м·град); α_t – коэффициент теплоотдачи, показывающий количество тепла, передаваемое единице поверхности тела от теплоносителя в единицу времени при разности температур между поверхностью и теплоносителем, равной 1 °С, Вт/(м²·град); τ – время воздействия; ω – частота m -гармоники, с⁻¹; α – коэффициент линейного расширения материала, 1/°С; σ_y – главные нормальные напряжения, Н/м²; E – модуль упругости, Н/м²; ν – коэффициент Пуассона; t_m – амплитуда колебаний температуры.

Результаты исследований термических напряжений на поверхности плоской детали по выражению (1) представлены графически на рис. 2:

- максимальная нагрузка от термических напряжений при циклическом нагреве приходится на поверхностный слой детали, амплитуда колебаний в глубинных слоях ниже амплитуды колебаний напряжений на поверхности;

- при фиксированном значении $\omega R^2/a$ амплитуда колебаний термических напряжений и деформаций на поверхности плоской детали больше, чем выше значение $\alpha_t R/\lambda$. Следовательно, чем выше интенсивность теплообмена, тем быстрее деталь разрушится от усталости, тем меньше должно быть значение амплитуды колебания температуры среды t_m , при которой происходит приспособляемость детали к заданному циклу теплового нагружения;

- при фиксированном значении $\alpha_t R/\lambda$ амплитуда термических напряжений и деформаций на поверхности детали существенным образом зависит от частоты колебания температуры среды и от $\omega R^2/a$. Если $\omega R^2/a \rightarrow 0$ или $\omega R^2/a \rightarrow \infty$, амплитуда колебаний термических напряжений стремится к нулю, долговечность детали зависит от частоты колебаний температуры.

На рис. 3 представлены исследования зависимости амплитуды колебаний термических напряжений по сечению детали от формы температурного цикла для одного цикла нагрев–охлаждение в виде безразмерной функции $x/R = 1$:

$$\frac{\sigma_{y(1-v)}}{\alpha E t_m} = \Phi \left(\frac{R \alpha}{\lambda}, \frac{\omega R^2}{a}, \frac{x}{R}, \frac{a \tau}{R^2} \right), \quad (2)$$

где $t_m = \left| \frac{t_1 - t_2}{2} \right|$ – амплитуда колебания температуры среды.

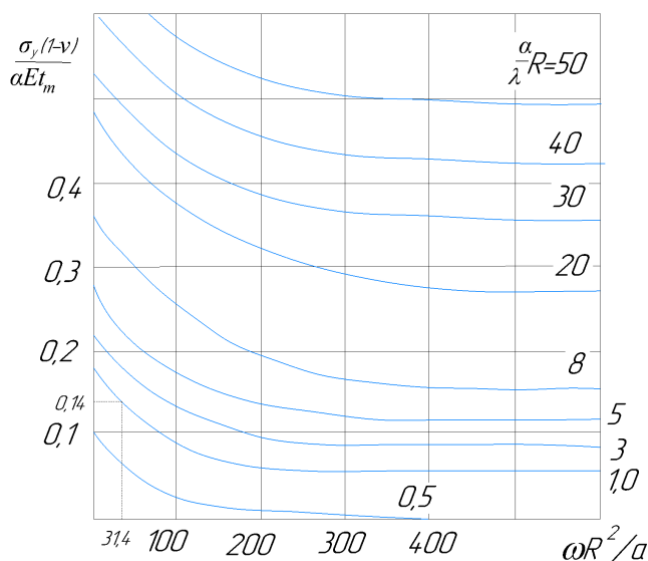


Рис. 2. Амплитуда термических напряжений на поверхности детали

В рассмотренных примерах (рис. 3) пределы изменения термических напряжений на поверхности детали существенно зависят от конкретного вида температурного цикла среды. Максимальное значение амплитуды термических напряжений и минимальное значение приспособляющих температурных нагрузок возникает при прямоугольном цикле. И наоборот, минимальные термические напряжения – при пилообразном. Поэтому при решении вопроса о приспособляемости или усталости материала детали нужно учитывать конкретный вид температурного цикла.

Например, амплитуда температурных напряжений на поверхности детали, подверженной периодическим тепловым воздействиям со стороны среды (при длительности периода нагрев–охлаждение $\Delta t_0 = 0,05$ ч; минимальной температуре цикла $t_1 = 100$ °С, максимальной – $t_2 = 800$ °С, материал детали сталь 35, $\lambda = 40$ Вт/(м · град), $a = 0,04$ м²/ч, толщина детали $2R = 0,04$ м, коэффициент теплоотдачи $\alpha_T = 400$ Вт/(м² · град), модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$; коэффициент линейного расширения $\alpha = 13 \cdot 10^{-6}$ 1/град), составит:

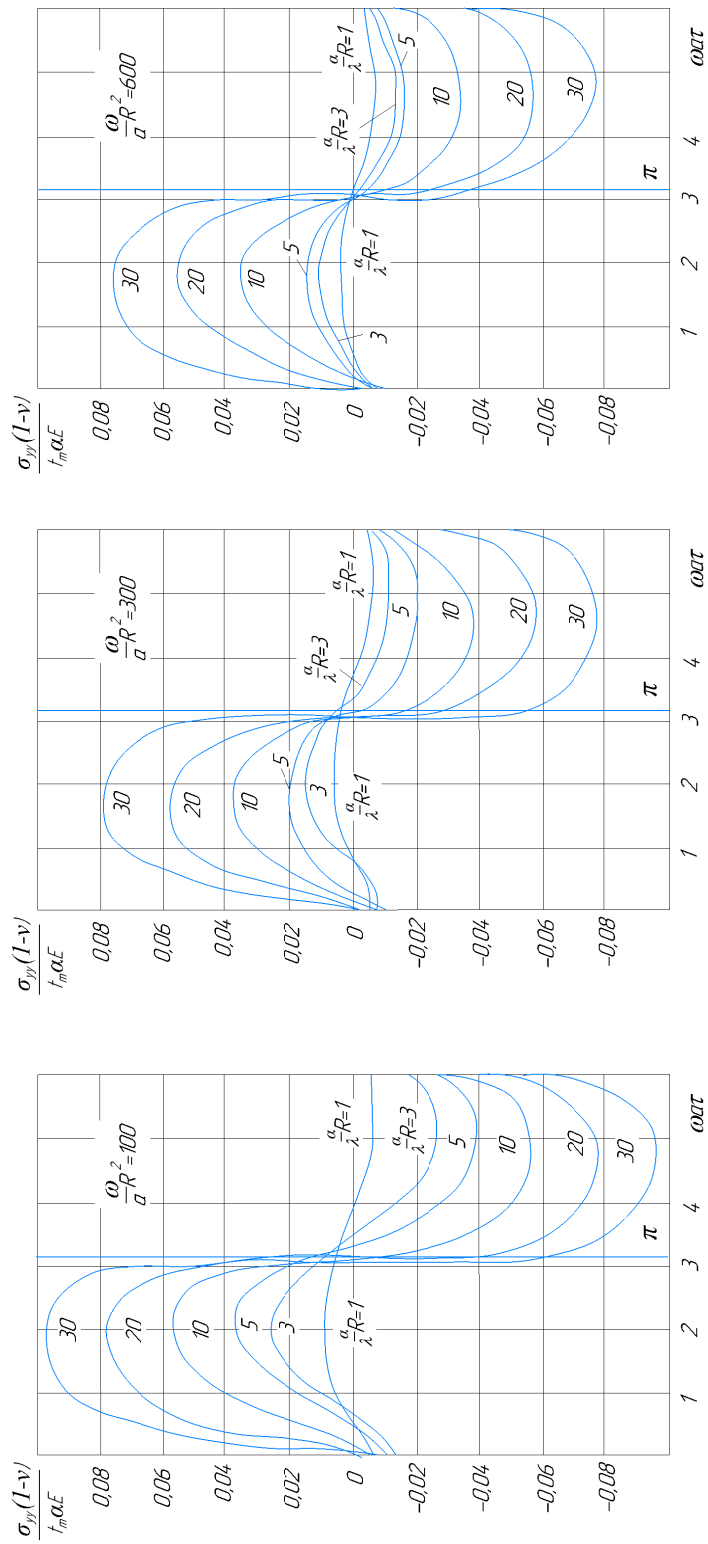
$$\alpha_T R / \lambda = 1,0; \omega R^2 / a = 2\pi R^2 / (\Delta t_0 a) = 31,4; t_m = 350 \text{ °С},$$

по рис. 2 находим

$$\frac{\sigma_y(1-\nu)}{\alpha E t_m} = 0,14.$$

Амплитуда колебания температурных напряжений на поверхности плоской детали в размерном виде:

$$\sigma_y = \frac{0,14 t_m \alpha E}{1-\nu} = 1,7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2.$$



a)

Рис. 3. Изменение во времени термических напряжений на поверхности детали при различных циклах температуры среды:
 a – синусоидальном; δ – пилообразном, ϵ – прямоугольном

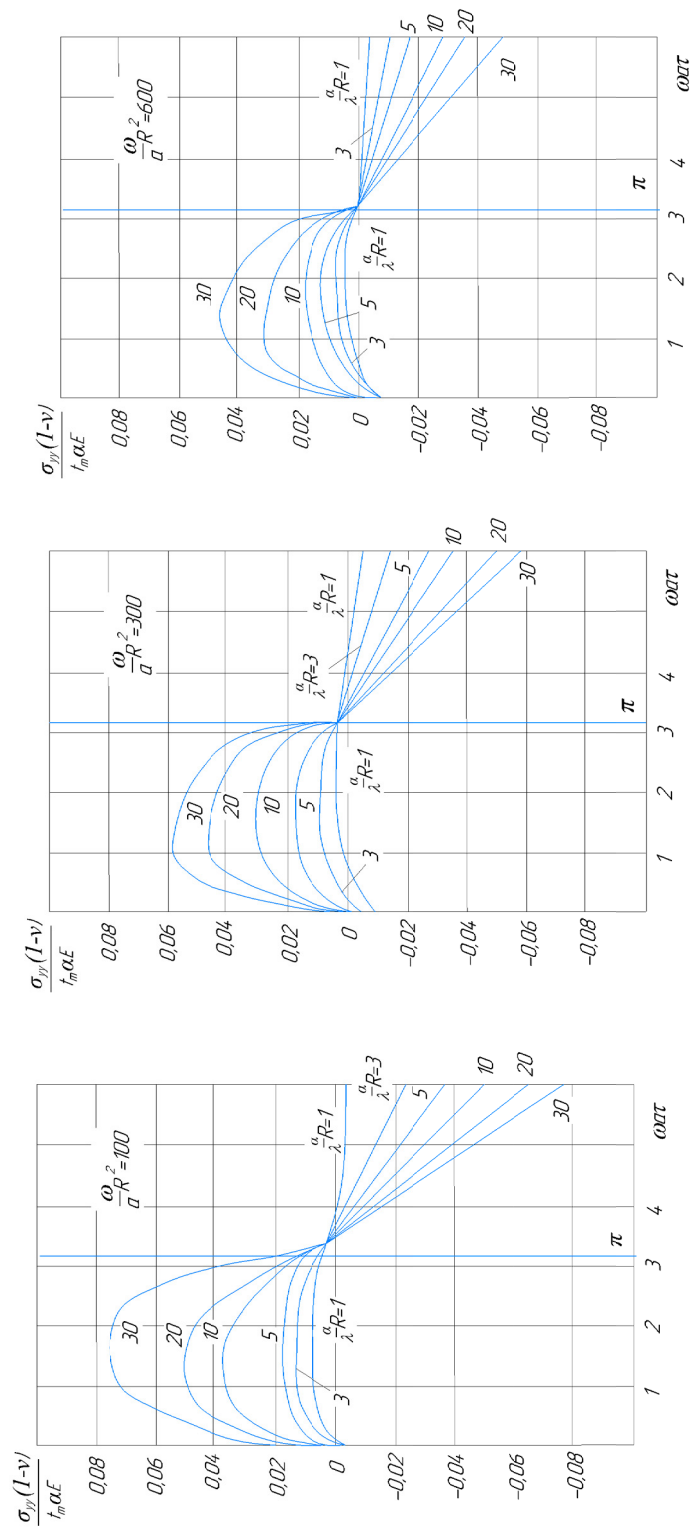


Рис. 3. Продолжение

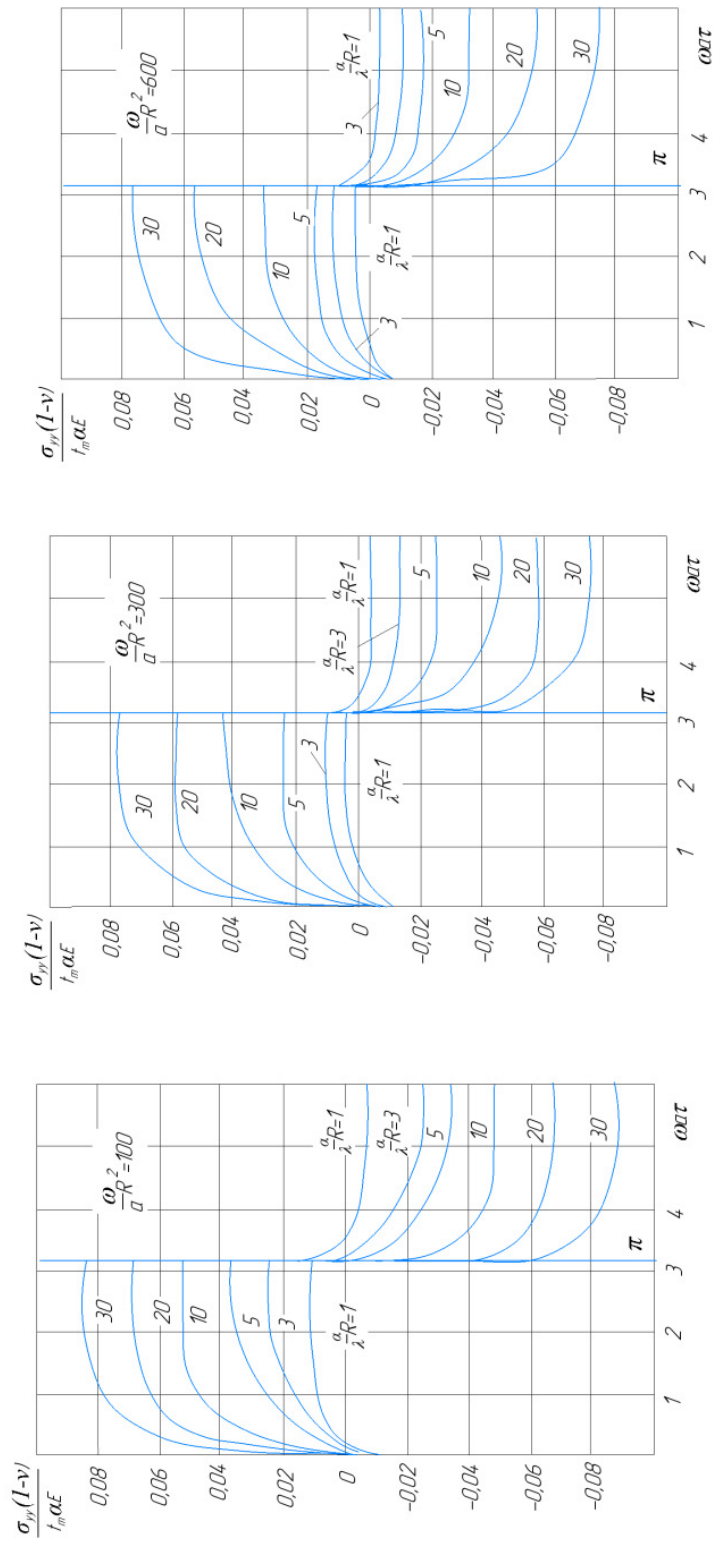


Рис. 3. Окончание

3. Анализ полученных результатов

Теоретические исследования проверены цифровым моделированием и экспериментально. Результаты на рис. 4 представлены в виде цифровых моделей температурных напряжений.

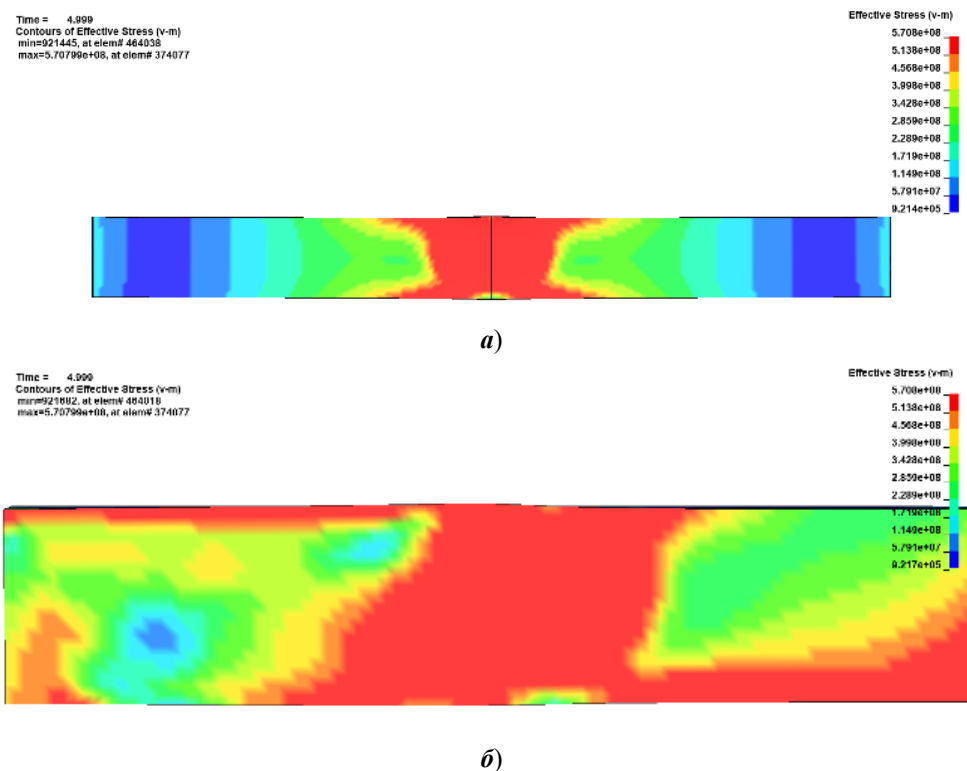


Рис. 4. Распределения температурных напряжений: *a* – в поперечном сечении соединяемых деталей; *б* – в продольном сечении соединяемых деталей

Если происходит несимметричный периодический нагрев детали, то тепловой поток, изменяющийся по времени по-простому и по сложному гармоническим законам при отсутствии закрепления детали, можно представить в виде графической зависимости амплитуды термических напряжений на поверхности от $\omega R^2/a$ (рис. 5).

Кривая I рассчитана для $\alpha_T R/\lambda = 0$, кривая II – для $\alpha_T R/\lambda = \infty$. Все остальные промежуточные расчетные значения $\alpha_T R/\lambda$ будут расположены между линиями I и II. Анализируя рис. 5, можно утверждать, при несимметричном периодическом нагреве детали амплитуда колебаний термических напряжений на поверхности $x = R$ не зависит от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$.

Например, незакрепленная деталь толщиной $R = 0,1$ мм находится под воздействием двух сред, одна из которых имеет постоянную температуру на поверхности $t = 20$ °С, другая обеспечивает прохождение через поверхность $x = R$ теплового потока, изменяющегося по времени по простому гармоническому закону. Амплитуда колебаний теплового потока $q = 10^5$ Вт/м², период

колебаний 0,01 ч. Материал детали сталь 15, $\lambda = 50$ Вт/м·град, $a = 0,05$ м²/ч, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu = 0,25$; $\alpha_T = 14 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

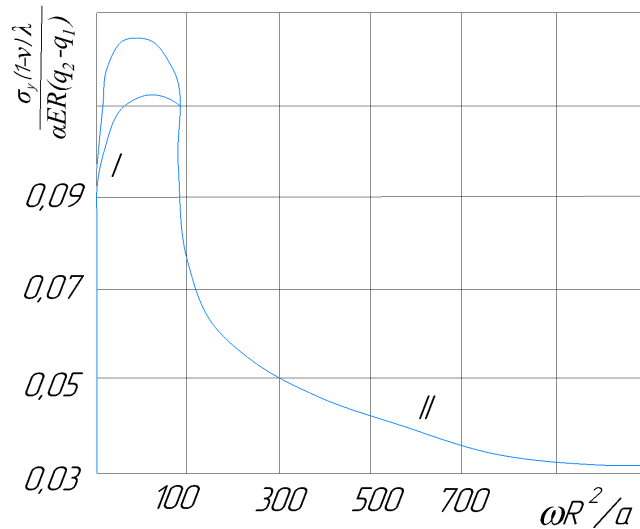


Рис. 5. Зависимость амплитуды термических напряжений на поверхности $x = R$ от комплекса $\omega R^2/a$

Амплитуда колебаний термических напряжений на поверхности:

$$\omega R^2/a = 2\pi R^2/(\Delta\tau_0 a) = 125,6;$$

по рис. 5 находим:

$$\frac{\sigma_y(1-\nu)\lambda}{\alpha E q R} = 0,07.$$

Амплитуда температурных напряжений в размерном виде на поверхности:

$$\sigma_y = \frac{0,07 q R \alpha E}{(1-\nu)\lambda} = \frac{0,07 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{11}}{(1-0,25) \cdot 50} = 0,52 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2.$$

Таким образом, теоретические исследования показывают, что амплитуда термических напряжений на поверхности $x = R$ мало зависит от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ и имеет место лишь при небольших значениях $\omega R^2/a$. При большом значении $\omega R^2/a$ зависимость амплитуды температурных напряжений на поверхности $x = R$ от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ отсутствует.

Заключение

При моделировании выявлено, что нагрев соединяемых деталей при послойной лазерной сварке может проходить по синусоидальному, прямоугольному, пилообразному циклам с одинаковой длительностью периода охлаждения и периода нагрева. Пределы изменения термических напряжений

на поверхности детали существенно зависят от конкретного вида температурного цикла среды. Максимальное значение амплитуды термических напряжений и минимальное значение приспособляющих температурных нагрузок возникает при прямоугольном цикле, минимальные термические напряжения – при пилообразном.

При несимметричном периодическом нагреве детали амплитуда колебаний термических напряжений на поверхности $x = R$ не зависит от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ и имеет место лишь при небольших значениях $\omega R^2/a$. При большом значении $\omega R^2/a$ зависимость амплитуды температурных напряжений на поверхности $x = R$ от интенсивности теплообмена на поверхности $x = 0$ отсутствует.

Проведенные опытно-промышленные испытания показали, что послойная сварка лазерным лучом стального листа толщиной 20 мм со скоростью 100 м/ч происходит за 1 проход. Коробление металла не замечено. Результаты металлографического анализа структуры металла согласуются с полученными данными изменения напряжений по сечению детали. Это подтверждает точность проведения теоретического и цифрового экспериментов. Применение технологии позволяет ее использовать стационарно и в передвижной мобильной установке.

Список литературы

1. Игнатов А. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами // Фотоника. 2008. № 6 (12). С. 10–17. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2017/03/29/3100/> (дата обращения: 23.04.2022).
2. Ушаков А. Б., Морозова О. П., Бегунов И. А., Шамов Е. М. [и др.]. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. 2017. № S2 (754). С. 100–107.
3. Ефимов К. Н., Лобода Е. Л., Овчинников В. А., Якимов А. С. Математическое моделирование воздействия колебаний затупленного по сфере конического тела на сопряженный тепломассообмен в его покрытии // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 1. С. 136.
4. Montevecthia F., Venturinia G., Scippaa A., Campatellia G. Finite element modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing process // Procedia CIRP. 2016. Vol. 55 P. 109–114. doi:10.1016/j.procir.2016.08.024

References

1. Ignatov A. Laser welding of steels with powerful SO₂ lasers. *Fotonika = Optoelectronics*. 2008;(6):10–17. (In Russ.). Available at: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2017/03/29/3100/> (accessed 23.04.2022).
2. Ushakov A.B., Morozova O.P., Begunov I.A., Shamov E.M. [et al.]. Technology of laser welding of main pipelines. *Gazovaya promyshlennost' = Gas industry*. 2017;(S2): 100–107. (In Russ.)
3. Efimov K.N., Loboda E.L., Ovchinnikov V.A., Yakimov A.S. Mathematical modeling of the impact of vibrations of a spherically blunted conical body on the conjugate heat and mass transfer in its coating. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Engineering and physical journal*. 2021;94(1):136. (In Russ.)
4. Montevecthia F., Venturinia G., Scippaa A., Campatellia G. Finite element modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing process. *Procedia CIRP*. 2016;55:109–114. doi:10.1016/j.procir.2016.08.024

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Николаевна Иванова

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник отдела моделирования и синтеза технологических структур, Институт механики, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (Россия, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34); профессор кафедры автоматизации информационных и инженерных технологий, Чайковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Россия, г. Чайковский, ул. Ленина, 73)

E-mail: rsg078829@mail.ru

Tat'yana N. Ivanova

Doctor of engineering sciences, professor, senior staff scientist of the department of modeling and synthesis of technological structures, Institute of Mechanics, Udmurt Federal Research Center of Ural branch of the Russian Academy of Sciences (34 Tatyana Baramzinoy street, Izhevsk, Russia); professor of the sub-department of automation of information and engineering technologies, Tchaikovsky branch of the Perm National Research Polytechnic University (73 Lenina street, Tchaikovsky, Russia)

Александр Юрьевич Муйземнек

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики и графики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Aleksandr Yu. Muzyemnek

Doctor of engineering sciences, professor, head of the sub-department of theoretical and applied mechanics and graphics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 02.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.03.2022

Принята к публикации / Accepted 25.04.2022