

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ РАСТУЩИХ ТЕЛ ПРИ РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ НАПЛАВОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И. К. СЕНЧЕНКОВ<sup>1</sup>, И. А. РЯБЦЕВ<sup>2</sup>, Э. ТУРЫК<sup>3</sup>, О. П. ЧЕРВИНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины.

03057, Киев-57, ул. Нестерова, 3. E-mail: ang@imech.freenet.kiev.ua

<sup>2</sup>Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины. 0360, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>Институт сварки. 44100, г. Гливице, Польша, ул. Б. Чеслава, 16-18.

E-mail: eugeniusz.turyk@glivice.pl

На основе теории растущих тел и унифицированной модели течения разработана модель оценки термомеханического состояния детали при многослойной наплавке, а также конечно-элементная методика численной реализации модели. На примере наплавки (наращивания) цилиндра по боковой поверхности установлено, что схема одномоментного наращивания позволяет достаточно быстро получить количественные оценки уровня напряжений и деформаций при анализе различных вариантов технологических решений многослойной наплавки деталей. Однако она не позволяет учесть существенную неоднородность и ячеистую структуру распределений, а лишь описывает плавное усредненное изменение характеристик напряжений и деформаций вдоль цилиндра. Она не позволяет также исследовать такие тонкие технологические вопросы, как влияние на напряженно-деформированное состояние детали различных схем перекрытия наплавляемых валков. В этом случае рекомендуется использовать методику расчета по схеме поваликового наращивания (наплавки). Удовлетворительное в целом согласование расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об обоснованности и достоверности разработанного подхода к моделированию термомеханических процессов при многослойной наплавке деталей. Библиогр. 14, рис. 9.

*Ключевые слова:* наплавка, аддитивные технологии, теория растущих тел, напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, наплавленные валки, наплавленные слои

По общепринятому определению аддитивные технологии — это технологии производства деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели последовательным послойным нанесением материала [1–4]. Согласно этому определению наплавку также можно отнести к аддитивным технологиям. Однако до сих пор при разработке аддитивных технологий с использованием сварочных источников нагрева основное внимание уделялось лазеру и электронному лучу [5, 6]. Другим способам, в частности наплавке, в качестве аддитивных технологий уделено меньше внимания. Не достаточно анализировался также тот факт, что послойное нанесение расплавленного металла в аддитивных технологиях ведет к тому, что в готовых деталях формируется определенное напряженно-деформированное состояние (НДС), которое может привести к остаточным деформациям или появлению в них трещин.

Экспериментальные методы исследования НДС являются дорогими и трудоемкими процессами, дающими весьма ограниченную инфор-

мацию. Поэтому разработка моделей и методик математического моделирования напряженно-деформированного и микроструктурного состояния деталей в процессе наращивания, остаточного состояния, а также напряжений в процессе эксплуатации является актуальной задачей.

Цель данной работы — создание модели и методики расчета напряженно-деформированного состояния деталей, изготавливаемых с применением аддитивных наплавочных технологий. В основе методики лежит теория растущих тел [7], которая в наибольшей степени моделирует процесс многослойной наплавки [8].

Механическое поведение материала описывается моделью Боднера–Партома [9], которая включает следующие соотношения в прямоугольной декартовой системе координат  $Oxyz$ :

– закон течения и уравнение пластической несжимаемости

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^e, \quad \dot{\epsilon}_{kk}^p = 0, \quad i, j = x, y, z; \quad (1)$$

– закон течения Прандтля–Рейсса

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{D_0}{J_2^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{K_0 + K}{\sqrt{3J_2}} \right)^{2n} \right] s_{ij}, \quad (2)$$

где

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}; \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}; \quad \sigma_{kk} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz};$$

– эволюционное уравнение для параметра изотропного упрочнения  $K$

$$\dot{K} = m_1 (K_1 - K) \dot{W}_p, \quad K(0) = 0, \quad (3)$$

где  $\dot{W}_p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p$ ;  $D_0, K_0, K_1, m_1, n$  — параметры модели;

– закон Гука

$$\sigma_{kk} = 3K_v (\epsilon_{kk} - 3\alpha(\theta - \theta_0)), \quad s_{ij} = 2G(e_{ij} - \epsilon_{ij}^p), \quad (4)$$

$$e_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \delta_{ij},$$

где  $G, K_v, \alpha$  — модули сдвига, объемного сжатия и коэффициент линейного теплового расширения.

Соотношения дополняются универсальными уравнениями квазистатического равновесия и теплопроводности, а также соответствующими граничными и начальными условиями.

Рассматриваются две модели процесса многослойной наплавки деталей. Первая — поваликовая послойная наплавка (рис. 1, а), вторая — одномоментная послойная наплавка (рис. 1, б).

В первой модели наращивания учитывается наплавка каждого индивидуального валика в каждом из слоев. Во второй модели, называемой одномоментной наплавкой, теория растущих тел используется для моделирования последовательного одномоментного нанесения каждого отдельного наплавляемого слоя. Временной интервал между

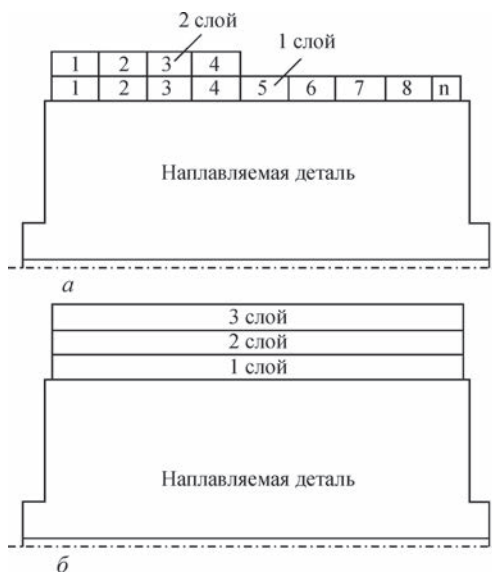


Рис. 1. Схемы моделей многослойной наплавки: а — поваликовая послойная (цифрами указаны номера валиков в порядке их наложения в каждом слое); б — одномоментная послойная

присоединениями этих валиков или слоев, их размеры, температура материала, время охлаждения и т. п. выбираются из условия их эквивалентности геометрическим, энергетическим и прочим параметрам технологического процесса наплавки.

При моделировании растущих в процессе наплавки тел используются два подхода. Первый из них предусматривает построение конечно-элементной сетки (КЭ-сетки), которая покрывает как наплавляемую деталь, так и все наплавляемые в будущем слои. Таким образом, количество узлов КЭ-сетки не изменяется в процессе численного моделирования. Сущность второго, более экономичного, подхода состоит в последовательном присоединении элементов наращиваемого материала. При этом количество конечных элементов изменяется. Области наплавки в первом подходе или наплавляемому элементу во втором подходе первоначально приписываются свойства материала «пустоты», который считается термоупругим материалом со следующими характеристиками:

$$E = 0; \nu = 0,5; \alpha = 0, \quad (5)$$

где  $E$  — модуль упругости,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\alpha$  — коэффициент линейного термического расширения.

Значение коэффициента Пуассона  $\nu = 0,5$  выбрано из условия соответствия свойствам расплавленного (несжимаемого) материала, которым будет заполняться элемент. При этом может иметь место только деформация формоизменения. Теплофизические свойства «пустоты» принимаются такими же, как у наплавляемого металла. Следовательно, элемент «пустой» только с точки зрения механики. В процессе заполнения, который рассматривается как процесс, развивающийся во времени, «пустые» элементы КЭ-сетки будут заполняться расплавом наплавляемого материала. В расчетах учитывается тот факт, что в процессе заполнения элементов (наплавки) деформируется вся КЭ-сетка, как покрывающая деталь, так и «пустые» элементы.

Пусть в момент заполнения  $t^*$  некоторый пустой элемент сетки  $\Delta V(t^*)$ , примыкающий к поверхности наращивания, имеет деформацию  $\epsilon_{ij}$  и пусть он заполняется расплавом материала, имеющим температуру  $\theta^*$ , и, который в момент заполнения является ненапряженным. Тогда в наплавляемом элементе:

$$\sigma_{ij} = 0, \quad i, j = x, y, z \quad \text{при } t = t^*. \quad (6)$$

Условие (6) в терминах определяющих уравнений  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\epsilon_{kl}, \theta)$  можно записать в виде:

$$\sigma_{ij}(\epsilon_{kl}^*, \theta^*) = 0 \quad \text{в элементе сетки} \quad (7)$$

$$\Delta V(t^*) i, j, k, l \leftrightarrow x, y, z.$$

Равенство (7) указывает на отсутствие напряжений (условие (6)) в наплавляемом элементе  $\Delta V$ , который имеет начальную деформацию  $\varepsilon_{ij}^*$  при температуре заполнения  $\theta^*$ .

Предполагается, что неупругая деформация наплавленного металла в момент времени  $t^*$  заполнения элемента сетки отсутствует:

$$\varepsilon_{ij}^p(t^*) = 0 \text{ в элементе сетки } \Delta V(t^*). \quad (8)$$

Для того, чтобы были выполнены условия (2) и (3), необходимо при  $t > t^*$  модифицировать уравнение закона Гука для изотропного материала (4) следующим образом:

$$\begin{aligned} s_{ij} &= 2G_f(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - e_{ij}^*), \\ \sigma_{kk} &= 2K_f(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^* - 3\alpha_f(\theta - \theta^*)), \end{aligned} \quad (9)$$

а в уравнениях (2) и (3) принять:

$$\varepsilon_{ij}^p(t^*) = 0, \quad K(t^*) = 0, \quad K_0(t^*) = K_{0f}(\theta^*). \quad (10)$$

Здесь нижний индекс  $f$  показывает, что параметры относятся к материалу наплавленного слоя.

Таким образом, чтобы выполнить условие (6) в приповерхностном наращиваемом слое для всех элементов наплавляемого материала определяющие уравнения (1)–(4) индивидуализируются теми конкретными значениями деформации  $\varepsilon_{ij}^*$  и температуры  $\theta^*$ , при которых происходило их заполнение в момент времени  $t = t^*$ .

В качестве примера рассмотрим спиральную наплавку боковой поверхности цилиндра. В меридиональном сечении схема заполнения наплавленного слоя отдельными валиками (см. рис. 1, а) приведена на рис. 2.

Пусть началу наплавки  $N$ -го валика отвечает момент времени  $t = t_N$ . Процесс реализуется в такой последовательности:

1. В интервале времени  $(t_N, t_N + t_Q)$ , где  $t_Q$  — эффективное время работы источника, происходит одновременно разогрев: (а) «пустой» области 3 равномерно распределенным объемным источником тепла мощностью  $Q_K$  (индекс  $K$  — наплавка); (б) примыкающей области 4 сварочной дугой, являющейся объемным источником тепла мощностью  $Q_L$  (индекс  $L$  — дуга).

2. В момент  $t = t_N + t_Q$  оба источника отключаются, и происходит «заполнение» области 3, под которым понимается замена в этой области «пустого» материала со свойствами (1) материалом, описываемым системой уравнений (1)–(4) с учетом модификации (9) и (10), где  $\varepsilon_{ij}^*$  и  $\theta^*$  — деформации и температуры в узловых точках области 3 в момент заполнения.

3. В интервале времени  $(t_{N+Q}, t_{N+1})$  происходит остывание за счет теплопроводности вглубь детали и теплообмена с окружающей средой.

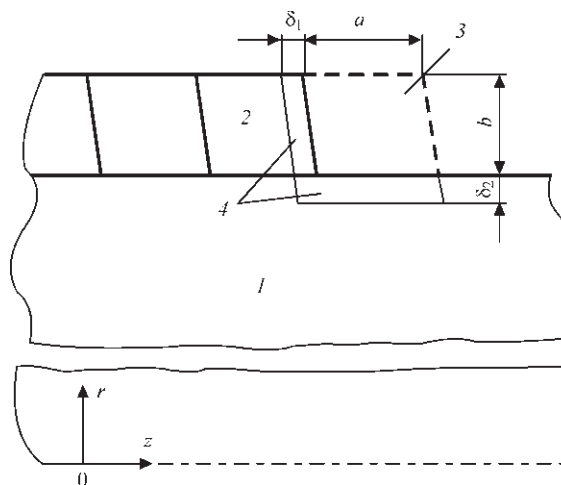


Рис. 2. Схема заполнения (наплавки)  $N$ -го валика: 1 — деталь; 2 — ранее наплавленный  $(N-1)$ -ый валик; 3 — область, отвечающая следующему  $N$ -ному валику и подлежащая заполнению (до заполнения — «пустая» область); 4 — нагреваемая сварочной дугой область приповерхностного объема в детали и ранее наплавленном валике;  $\delta_1$  — ширина нагреваемой области в материале валика  $N-1$  при выполнении  $N$ -го валика;  $\delta_2$  — ширина нагреваемой области в основном металле при выполнении  $N$ -го валика; штрих-пунктирная линия — ось детали

4. В момент  $t = t_{N+1}$  подсоединяется новый механически «пустой» элемент и процесс повторяется.

Тепло, поступающее в тело при наплавке, определяется соотношением:

$$\bar{Q} = \eta_T(\eta_E + \eta_Y)IU\Delta t_1 = \bar{Q}_E + \bar{Q}_Y, \quad (11)$$

где  $\eta_T$  — эффективный коэффициент мощности;  $\eta_E$  — эффективный к. п. д. нагрева детали дугой;  $\eta_Y$  — эффективный к. п. д. нагрева каплями электрода;  $\bar{Q}_E$  и  $\bar{Q}_Y$  — теплоты, соответственно, передаваемая телу детали дугой и поступающая в электрод:

$$\bar{Q}_E = \eta_T\eta_E IU\Delta t_1, \quad \bar{Q}_Y = \eta_T\eta_Y IU\Delta t_1, \quad (12)$$

где  $\Delta t_1$  — время наплавки ряда валиков, которое определено исходя из геометрических размеров наплавляемой поверхности и скорости наплавки.

Соответствующие объемные мощности тепловых источников вычисляются по формулам:

$$Q_E = \frac{\bar{Q}_E}{V_E t_Q}, \quad Q_Y = \frac{\bar{Q}_Y}{V_Y t_Q}, \quad (13)$$

где  $V_E$  — объем области, в которой действует источник тепла, получаемый вращением плоской фигуры 4 или 3 меридионального сечения вокруг оси детали;  $V_Y$  — объем области, получаемый вращением фигуры 3 (см. рис. 2),  $t_Q$  — эффективное время работы теплового источника.

Для схемы заполнения (см. рис. 2) приняты следующие значения набора геометрических параметров:  $\delta_1 = 10^{-3}$  м,  $\delta_2 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, а параметры

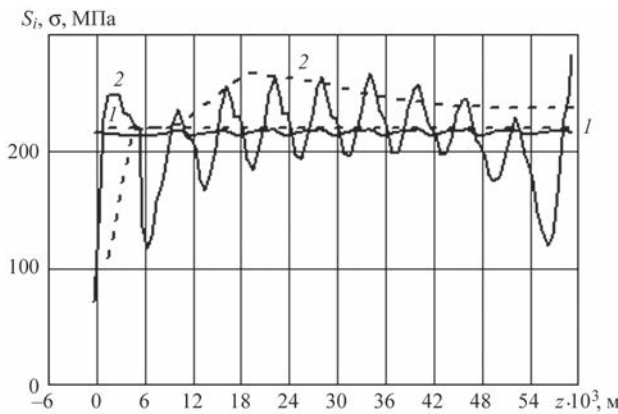


Рис. 3. Интенсивность напряжений  $s_i$  (кривая 1) и среднее напряжение  $\sigma_0$  (кривая 2) в первом наплавленном слое после наплавки второго слоя

$a$  и  $b$  определялись по ширине и высоте валика. Значения  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $t_Q$  выбирались с помощью численного эксперимента из условия приблизительного равенства температур в объемах  $V_{\dot{E}}$  и  $V_{\dot{Y}}$  в момент заполнения области валика 3 расплавленным материалом.

Приняты следующие значения приведенных величин при определении тепловложения [8]:  $\eta_T = 0,6$ ;  $\eta_{\dot{E}} = 0,8$ ;  $\eta_{\dot{Y}} = 0,2$ . Расчеты проводились с использованием физико-механических характеристик соответствующих материалов. Краевая задача термомеханики решалась методом конечных элементов. Подробное описание численной методики дано в работах [10–12].

Приведем сравнение результатов расчетов остаточного напряженно-деформированного состояния, полученных в рамках схем постепенного и одновременного наращивания (см. рис. 1,  $a, б$ ).

В качестве примера рассматривается цилиндр из стали 35ХМ, наращиваемый двумя слоями хромоникелевой стали 10Х18Н10 с аустенитно-ферритной структурой. Цилиндр имеет диаметр  $D = 0,126$  м и длину  $L = 0,250$  м. Толщины первого и второго слоев одинаковы и равны 2,3 мм. Наплавка ведется с предварительным подогревом  $\theta = 300$  °С.

В схеме постепенного наращивания для сокращения объема вычислений наносится по 10 ва-

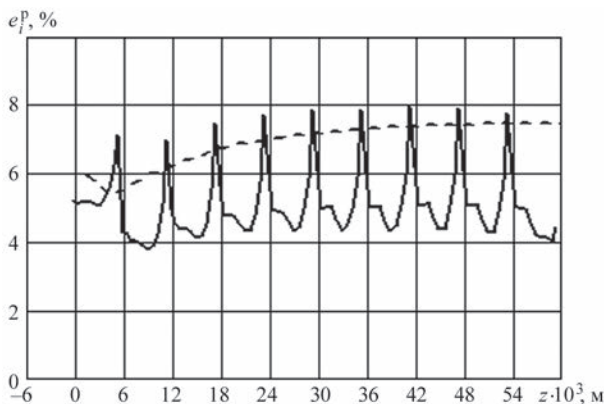


Рис. 4. Интенсивность остаточных неупругих деформаций в первом наплавленном слое после наплавки второго слоя

ликов в каждом слое. Расчеты показали, что концевые эффекты локализованы в зонах первых и последних трех валиков. Следовательно, в области между третьим и седьмым валиками имеет место остаточное напряженно-деформированное состояние, которое можно ассоциировать с областью регулярного состояния основной части полностью наращенного цилиндра.

В качестве характеристик напряженно-деформированного состояния используются интенсивность девиатора тензора напряжений

$$s_i = J_2^{1/2},$$

интенсивность неупругих деформаций

$$\epsilon_i^p = (-e_{ij}^p e_{ij}^p)$$

и среднее нормальное напряжение

$$\sigma_0 = (\sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\phi\phi}) / 3.$$

Интенсивность  $s_i$  отвечает за неупругие процессы и разрушение по вязкому механизму. Среднее напряжение обобщенно идентифицирует состояние растяжения ( $\sigma_0 > 0$ ) или сжатия.

На рис. 3 и 4 показаны распределения характеристик НДС вдоль линии  $Oz$  при  $r = 0,064$  м (половина толщины первого слоя). Здесь и ниже сплошные линии отвечают схеме поваликовой, а штриховые — одномоментной послойной наплавки.

Распределения вдоль срединной линии  $r = 0,064$  м остаточных напряжений и деформаций, которые сформировались во втором наращенном слое после его остывания до 20 °С, представлены сплошными линиями на рис. 5 и 6.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Схема одномоментного послойного наращивания не позволяет учесть неоднородной ячеистой структуры распределений, а описывает плавное усредненное изменение характеристик напряжений и деформаций вдоль наплавляемого цилиндра.

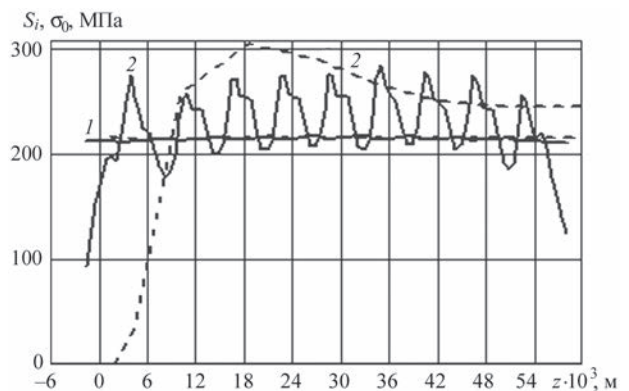


Рис. 5. Интенсивность напряжений  $s_i$  (кривая 1) и среднее напряжение  $\sigma_0$  (кривая 2) во втором наплавленном слое



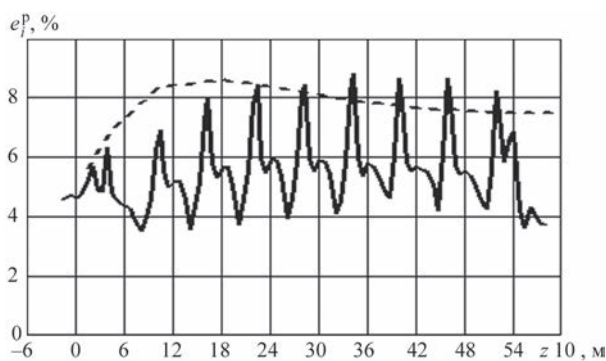


Рис. 6. Интенсивность остаточных неупругих деформаций  $e_i^p$  во втором наплавленном слое

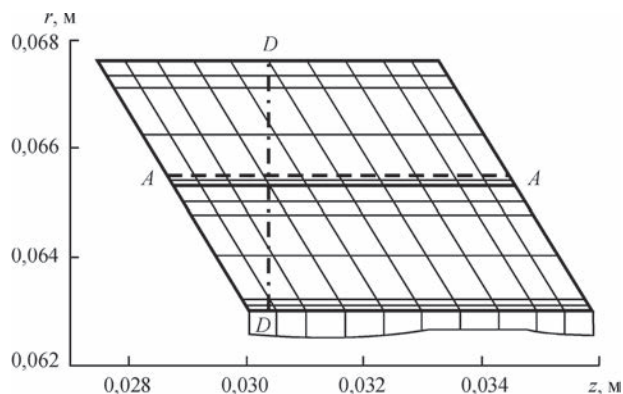


Рис. 7. Схематический фрагмент наплавленных слоев. Штрихпунктирная линия  $D-D$  — ось отверстия; штриховая линия  $A-A$  — глубина отверстия; тонкие линии — КЭ-сетка

2. Схеме одномоментного послойного наращивания отвечают более протяженные зоны концевых возмущений напряженно-деформированного состояния.

3. В области регулярного распределения характеристик НДС результаты расчетов по одномоментной послойной схеме удовлетворительно согласуются с результатами, полученными на основе схемы поваликовой наплавки. В силу этого обстоятельства при упрощенных расчетах можно использовать мгновенную послойную схему.

Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Измерения проводились с помощью метода сверления отверстий (The hole-drilling method) [13, 14].

Исследование проводилось на шестом валике при двухслойной поваликовой наплавке слоев. Соответствующий фрагмент наращенного слоя показан на рис. 7. Для измерения остаточных напряжений в центре валика, расположенного в сечении  $z = 0,0304$  м, сверлилось отверстие диаметром 1,6 мм на глубину  $\Delta r = 2,2$  мм. Ось отверстия обозначена вертикальной штрих-пунктирной линией. Линия  $A-A$  показывает глубину отверстия.

На рис. 8 сплошными линиями показаны расчетные осевые распределения компонент  $\sigma_{zz}$  (кривая 1) и  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (кривая 2) в сечении  $A-A$ . Треугольниками обозначены экспериментальные значения максимального и минимального главных напря-

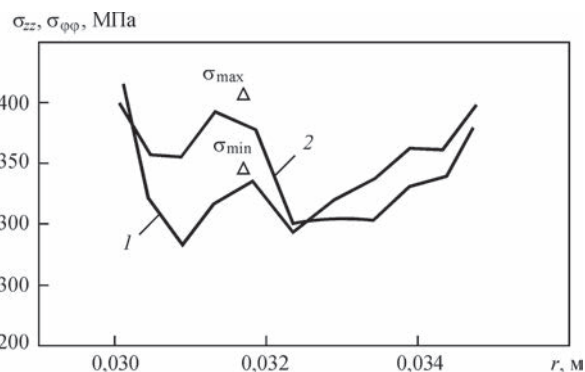


Рис. 8. Осевое напряжение (кривая 1) и окружное напряжение (кривая 2) вдоль линии  $A-A$  на фрагменте наплавленных слоев, приведенном на рис. 7. Треугольниками показаны экспериментальные значения

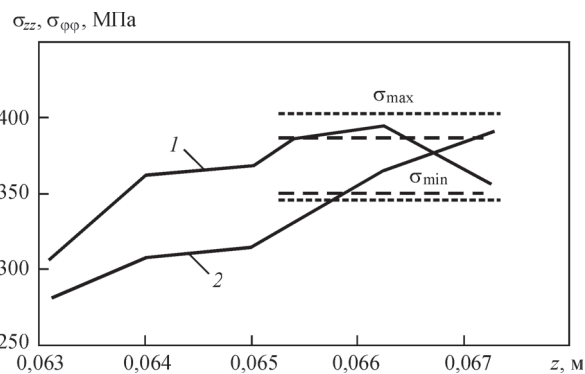


Рис. 9. Распределение остаточных осевых  $\sigma_{zz}$  (линия 1) и окружных  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (линия 2) напряжений по толщине наплавленного слоя в сечении  $z = 0,0304$  м. Пунктирные линии — экспериментальные значения средних по толщине главных напряжений в наплавленном слое; штриховые линии — расчетные значения этих величин

жений  $\sigma_{\min}$  и  $\sigma_{\max}$ . Видно, что в пределах валика компоненты напряжения изменяются весьма существенно. Однако в рассматриваемом сечении имеет место хорошее согласование данных.

Сопоставление удобнее проводить с использованием радиальных распределений напряжений в наращенном слое. Согласно экспериментальной методике измеренные напряжения соответствуют и должны сравниваться со следующими расчетными величинами в данном сечении:

$$\sigma_{\min} = \left\langle \min(\sigma_{zz}(r), \sigma_{\varphi\varphi}(r)) \right\rangle_{\Delta r},$$

$$\sigma_{\max} = \left\langle \max(\sigma_{zz}(r), \sigma_{\varphi\varphi}(r)) \right\rangle_{\Delta r}.$$

Здесь  $\langle f(r) \rangle_{\Delta r}$  обозначает усредненную по глубине отверстия величину:

$$\langle f(r) \rangle = \frac{2}{r_0^2 - (r_0 - \Delta r)^2} \int_{r_0 - \Delta r}^{r_0} f(r) r dr,$$

где  $r_0$  — наружный радиус наращенного ролика.

На рис. 9 сплошными линиями показаны расчетные распределения вдоль радиуса компонент

### 3D аддитивные технологии

напряжений  $\sigma_{zz}$  (кривая 1) и  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (кривая 2) в исследуемом сечении.

Штриховыми линиями показаны экспериментальные, а пунктирными — расчетные значения средних по глубине отверстия максимального и минимального главных напряжений. Видно, что максимальное и минимальное главные напряжения не связаны с какой-то одной компонентой. Так, на поверхности преобладает компонента  $\sigma_{\varphi\varphi}$ , а в более глубоких слоях максимальное значение определяется компонентой  $\sigma_{zz}$ .

#### Выводы

1. На основе теории растущих тел и унифицированной модели течения разработана модель оценки термомеханического состояния детали в процессе многослойной наплавки, а также конечно-элементная методика численной реализации модели. Удовлетворительное в целом согласование расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об обоснованности и достоверности разработанного подхода к моделированию термомеханических процессов при многослойной наплавке.

2. На примере наплавки (наращивания) цилиндра по боковой поверхности установлено, что схема одномоментного наращивания позволяет достаточно быстро получить количественные оценки уровня напряжений и деформаций при анализе различных вариантов технологических решений многослойной наплавки деталей. Однако она не позволяет учесть существенную неоднородность и ячеистую структуру распределений, а лишь описывает плавное усредненное изменение характеристик напряжений и деформаций вдоль цилиндра. Она не позволяет также исследовать такие тонкие технологические вопросы, как влияние на напряженно-деформированное состояние детали различных схем перекрытия наплавляемых валков. В этом случае рекомендуется использовать методику расчета по схеме поваликового наращивания (наплавки).

1. Балякин А. В. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания / А. В. Балякин, В. Г. Смелов, Л. А. Чемпинский // *Авиационная и ракетно-космическая техника. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2012. – № 3 (34). – С. 47–51.
2. Marya S. Additive manufacturing, derivative of welding and joining technology. A literature review / S. Marya, J. Y. Hascoet, S. K. Panigrah [et. al.] // *Документ IIW: DOC. XII-2185-14; DOC. IV-1195-14*.
3. Смуров И. Ю. О внедрении аддитивных технологий и производств в отечественную промышленность / И. Ю. Смуров, С. Г. Конов, Д. В. Котобан // *Новости материаловедения. Наука и техника*. – 2015. – № 2 (14). – С. 11–20.
4. Ковалев О. Б. Фундаментальные проблемы моделирования и диагностики процессов в лазерных технологиях аддитивного производства объемных металлоизделий / О. Б. Ковалев // *Сб. трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*, Казань, 20–24 августа 2015 года. С. 1836–1838.
5. Махненко В. И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров / В. И. Махненко., Т. Г. Кравцов. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 160 с.
6. Махненко В. И. Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств / В. И. Махненко, Т. Г. Кравцов, В. В. Севрюков // *Автоматическая сварка*. – 2001, № 1. – С.
7. Арутюнян Н. Х. Механика растущих вязкоупруго-пластичных тел / Н. Х. Арутюнян, А. Д. Дроздов, В. Э. Наумов. – М.: Наука, 1987. – 471 с.
8. *Технология сварки, пайки и резки. Энциклопедия. Т. III-4. Под редакцией Б. Е. Патона*. – М.: Машиностроение, 2006. – 768 с.
9. Bodner S. R. Unified plasticity – an engineering approach (Final report), Faculty of Mechanical Engineering, Technion – Israel Inst. of Techn. Haifa 32000, Israel – 2000. – 105 p.
10. Рябцев И. А. Теория и практика наплавочных работ / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков. – Киев: Экотехнология, 2013. – 400 с.
11. Рябцев И. А. Наплавка, материалы, технологии, математическое моделирование / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков., Е. Турык // *Гливице: Изд-во Силезского политехн. ин-та*. 44 – 100. – 2015. – 590 с.
12. Сенченков И. К. Расчет остаточных напряжений при многослойной спиральной наплавке цилиндрических деталей на основе теории наращивания вязкопластических тел / И. К. Сенченков, И. А. Рябцев, Е. Турык, Г. А. Табиева // *Сварочное производство*. – 2005, № 9. – С. 18 – 25.
13. Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain-gage method. – ASTM Standard E 837.
14. Measurement of residual stresses by the hole drilling strain gage method / Measurements Group Inc. Tech. Note, 1993. – 19 p.

Поступила в редакцию

#### Компания Ярдвэй Групп, КНР приглашает на работу трех инженеров-сварщиков

##### Требования к кандидатам:

- ◆ степень бакалавра или выше по специальностям: сварка, машиностроение, электротехника и родственные специальности;
  - ◆ мужчины, возраст 25–49 лет;
- ◆ базовое знание разговорного английского языка;
- ◆ интерес к китайской культуре, желание работать в КНР и других странах мира.

##### Сферы деятельности

Послепродажное обслуживание сварочного оборудования на предприятиях клиентов.  
Модернизация существующего и разработка нового сварочного оборудования.

Приветствуется опыт работы в иностранных компаниях.

E-mail: [masha@kiwayzh.com](mailto:masha@kiwayzh.com).

Tel: +8613809235810 (Kyiv time from 9:00-17:00). <http://www.yardwaygroup.com/>