

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.791.92: 004.942

doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-33-43

ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ СЛОЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СПЛАВА НА СТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Владимир Александрович Ерофеев^{1✉}, Станислав Сергеевич Полосков²,
Елена Александровна Страхова³

^{1,3} Тульский государственный университет, Тула, Россия

² МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

¹ va_erofeev@mail.ru

² stanislavpoloskov@gmail.com

³ strahova_e@mail.ru

Аннотация

Цель исследования состоит в оценке деформаций и напряжений, возникающих при наплавке слоя коррозионностойкого сплава на стальную поверхность.

Задача данной работы состоит в анализе деформаций и напряжений в наплавляемом слое.

Метод исследования – численное моделирование процесса формирования состояния наплавляемого слоя.

Новизна работы состоит в разработке метода оценки деформаций при последовательной наплавке валиков слоя.

Результаты исследования - методика оценки напряжённого состояния и деформаций в наплавленном слое основана на решении уравнения сов-

местимости перемещений, возникающих вследствие многократного нагревания и охлаждения металла при последовательной наплавке валиков.

Выводы: показано, что при многоваликовой наплавке имеет место накопление пластической деформации в слоях сопряжения наплавляемых валиков, которое достигает значений, соизмеримых с относительным удлинением; возможно применение описанной методики в инженерной практике при разработке технологии наплавки.

Ключевые слова: деформация, напряжение, дуговая наплавка, плазменная наплавка.

Ссылка для цитирования:

Ерофеев В.А. Оценочный расчет деформаций и напряжений при дуговой наплавке слоя коррозионностойкого сплава на стальную поверхность / В. А. Ерофеев, С. С. Полосков, Е. А. Страхова // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 33–43. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-33-43.

Original article

Open Access Article

ESTIMATE OF DEFORMATIONS AND STRESSES WHEN CORROSION-RESISTANT ALLOY SURFACING ON STEEL FACE

Vladimir Aleksandrovich Erofeev^{1✉}, Stanislav Sergeevich Poloskov²,
Elena Aleksandrovna Strakhova³

^{1,3} Tula State University, Tula, Russia

² MIPT (NRU), Dolgoprudny, Moscow region, Russia

¹ va_erofeev@mail.ru

² stanislavpoloskov@gmail.com

³ strahova_e@mail.ru

The study objective is to estimate the deformations and stresses that occur when a layer of corrosion-resistant alloy is deposited on a steel surface.

The problem to which the paper is devoted is to analyze deformations and stresses in the surfaced layer.

The research method is computer simulation of forming the state of the surfaced layer.

The novelty of the work is to develop a method for estimating deformations during sequential surfacing of layer beads.

Study results: the methodology for estimating the stress state and deformations in the surfaced layer is based on solving the equation of compatibility of displacements resulting from multiple heating and cooling of metal during sequential surfacing of beads.

Reference for citing:

Erofeev V.A. Estimation of deformations and stresses during arc deposition of a corrosion-resistant alloy layer on a steel surface /V. A. Erofeev, S. S. Polopov, E. A. Strakhova // Transport Engineering. – 2022. - № 4. – p. 33–43. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-33-43.

Введение

Задача данной работы состоит в анализе деформаций и напряжений в зоне выполнения дуговой и плазменной наплавки, выполняемой за большое количество проходов (рис. 1).



Рис. 1. Наплавленная поверхность элемента шарового крана и внутренний дефект в наплавленном слое

Fig. 1. The deposited surface of the ball valve element and an internal defect in the deposited layer

При наплавке множества валиков иногда наблюдаются дефекты в наплавленном слое в виде трещин, ориентированных вдоль линии сплавления валиков, но расположенных не на поверхности сплавления, а в глубине металла слоя.

Для объяснения появления таких дефектов сделано предположение, что они возникают вследствие высокого уровня напряжений и деформаций в наплавленном валике.

Оценка напряжённого состояния является важной задачей при разработке технологии наплавки. Её сложность при мно-

Conclusions: it is shown that with multi-bead surfacing, there is an accumulation of plastic deformation in the layers of contact of the surfaced beads, which reaches values that are equal to relative elongation; it is possible to apply the described technique in engineering practice when developing surfacing technology.

Keywords: deformation, stress, arc surfacing, plasma surfacing.

гопроходной наплавке не позволяет её решать численными методами на коммерческих конечно-элементных пакетах. Предложена процедура расчёта напряжённого состояния и деформаций, основанная на решении уравнения совместности перемещений при заданном распределении предельных температур при последовательном наложении валиков при допущении, что перемещения металла вдоль валика отсутствуют, а повторный нагрев вызывает дополнительную пластическую деформацию в ранее наплавленных валиках. Показано, что при последовательной наплавке валиков и изменения распределения предельных температур возникает сложная картина напряжённого состояния и деформации металла в зоне выполнения наплавки. Остаточные напряжения в предшествующих валиках существенно не изменяются, а пластическая деформация накапливается, максимальное её значение возникает в окрестности линии сопряжения последнего валика с подложкой. Описанная методика оценки уровня остаточных деформаций и напряжений при многоваликовой наплавке достаточно проста, что позволяет использовать её в инженерной практике при разработке технологии наплавки.

Решению задачи оценки напряжённого состояния, возникающего в металле при выполнении наплавки, посвящены многочисленные работы [1, 2], в которых приводятся различные методики расчёта сварочных деформаций и напряжений. Их общим недостатком является большая сложность

решения задачи о формировании напряжённо-деформированного состояния металла в окрестности сварного шва или наплавляемого слоя. Проблема особенно усложняется, если принять во внимание, что дуговая и плазменная наплавка обычно выполняется за большое количество проходов (рис. 2).

Моделирование формирования многоваликового слоя и расчёт его напряжённого состояния не предусмотрено процедурами коммерческих конечно-элементных пакетов [3].

Поэтому для решения этой задачи была разработана процедура расчёта напряжённого состояния и деформаций. Её основой является решение уравнения совместности перемещений при заданном распределении предельных температур при последовательном наложении валиков. Допускается, что перемещения металла

вдоль валика отсутствуют, а повторный нагрев вызывает дополнительную пластическую деформацию в ранее наплавленных валиках. Показано, что при последовательной наплавке валиков и изменения распределения предельных температур возникает сложная картина напряжённого состояния и деформации металла в зоне выполнения наплавки. Остаточные напряжения в предшествующих валиках существенно не изменяются, а пластическая деформация накапливается, максимальное её значение возникает в окрестности линии сопряжения последнего валика с подложкой. Описанная методика оценки уровня остаточных деформаций и напряжений при многоваликовой наплавке достаточно проста, что позволяет использовать её в инженерной практике при разработке технологии наплавки.

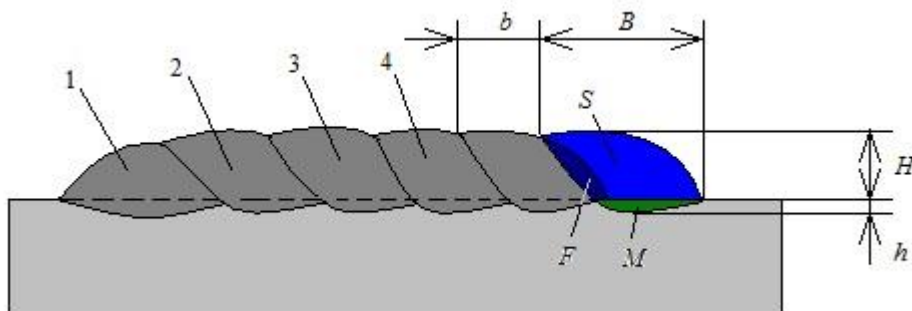


Рис. 2. Поперечное сечение последовательно наплавляемых валиков в один слой: 1...4 – номера валиков; b – смещение дуги; B – ширина наплавочной ванны; S , F , M – сечения наплавки, переplava предшествующего валика и расплава подложки; H – высота наплавки; h – проплавление подложки

Fig. 2. Cross-section of sequentially deposited rollers in one layer: 1...4 – roller numbers; b – arc offset; B – width of the surfacing bath; S , F , M – surfacing sections, sections of the remelting of the preceding roller and sections of the melt backing; H – surfacing height; h – melting of the backing

Материалы, модели, эксперименты и методы

Физическая модель. Термодеформационные процессы при наплавке и сварке определяются зависимостями механических свойств металла от температуры в широком диапазоне, до температуры плавления.

Модуль упругости и коэффициент линейного расширения в случае сварки сталей различных марок изменяются в указанных зонах шва при нагревании и охлаждении практически одинаково. Предел текучести в наплавляемом слое заметно

отличается, так как слой обычно имеет иной химический состав вследствие подачи присадочного материала и литую структуру. При наплавке на поверхность сталей на предел текучести существенно влияет закалка зоны термического влияния. Влияние термического цикла на структуру и механические свойства конструкционных сталей можно рассчитать по известным методикам [4]. Химический состав металла наплавляемого слоя близок к составу наплавляемого материала.

Деформации и напряжения при наплавке возникают вследствие изменения плотности металла при нагревании и плавлении. Это изменение до температур солидуса практически линейно и обычно характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения. Так как нагрев металла при наплавке осуществляется в небольшой зоне, окружённой холодным металлом, локальное тепловое расширение и подача наплавляемого материала приводит к перемещению металла в

направлении наплавочной ванны, что определяет форму поверхности наплавляемого валика. После кристаллизации металл шва охлаждается и уменьшает свой объём, что вызывает перемещение окружающего металла. Так как локальному перемещению сопротивляется окружающий металл, возникают напряжения.

На рис. 3 показан термодереформационный цикл формирования напряжённого состояния наплавленного слоя.

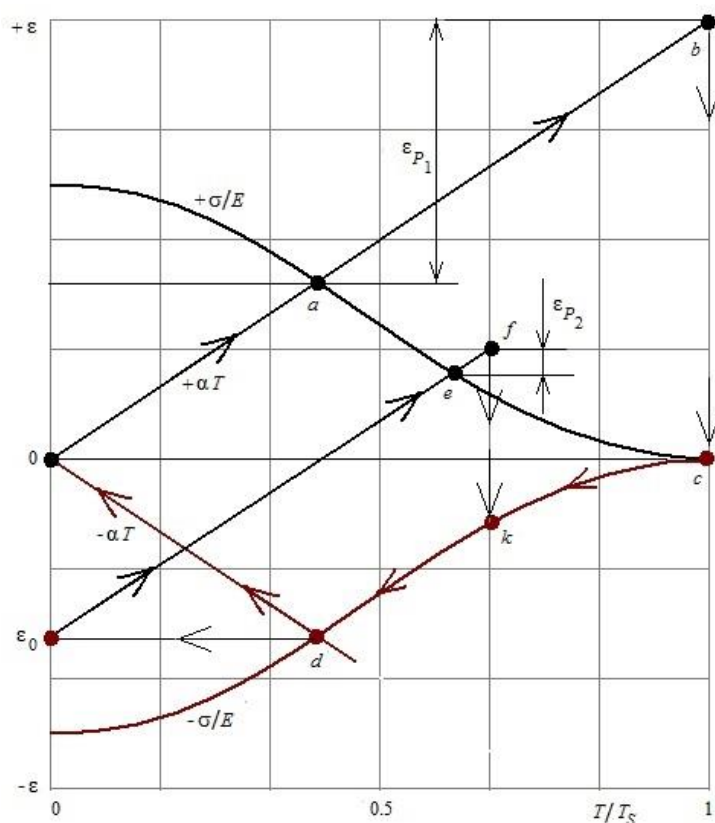


Рис. 3. Изменение соотношения между пределом текучести σ и модулем упругости E , относительного теплового расширения αT при нагревании и охлаждении металла и относительных пластических деформаций при формировании валика многопроходной наплавки ϵ_{p1} и при его повторном нагревании ϵ_{p2} при наплавке последующего валика
 Fig. 3. Change in the ratio between the yield strength σ and the modulus of elasticity E , change in relative thermal expansion αT during heating and cooling of metal and relative plastic deformations during the formation of a multi-pass surfacing roller ϵ_{p1} and when it is reheated ϵ_{p2} during the surfacing of a subsequent roller

При нагревании тепловое расширение металла определяется температурой T и коэффициентом линейного расширения α . Значение температуры, при которой

преобладают упругие деформации, определяется отношением предела текучести σ к модулю упругости E , которые снижаются с ростом температуры. При температуре

выше значения T_a (точка a , рис. 3) преобладают пластические деформации, максимальное значение которых ε_{p1} определяется максимальной температурой T_b (точка b , рис. 2). При наплавке валика при достижении температуры плавления T_s упругие деформации полностью исчезают, а пластические - перераспределяют металл и влияют на форму валика. При охлаждении после затвердевания металла (точка c , рис. 3) упругие деформации нарастают в соответствии со значением отношения $\frac{\sigma}{E}$, а

пластические - определяются разностью $\varepsilon_p = \alpha(T_m - T) - \frac{\sigma}{E}$, где T_m - максимальная

температура нагрева, T - текущая температура. При температуре T_d (точка d , рис. 3) изменение пластической деформации прекращается при значении $\alpha T_d = \frac{\sigma(T_d)}{E(T_d)}$, и

дальнейшее снижение температуры вызывает появление упругой деформации, которая при полном охлаждении (точка 0 , рис. 3) определяется максимальной пластической деформацией $\varepsilon_0 = \frac{\sigma(T_d)}{E(T_d)}$.

При наплавке следующего валика, расположенного рядом, упругая деформация начинается от значения остаточной деформации $\varepsilon = \alpha T - \varepsilon_0$. При нагревании до температуры T_e (точка e , рис.3) преобладает упругая деформация, при более высокой температуре - пластическая. Максимальная температура повторного нагрева T_f определяет уровень дополнительной пластической деформации ε_{p2} , изменяющей форму валика. При этой температуре сохраняются упругая составляющая $\frac{\sigma(T_f)}{E(T_f)}$,

а изменение этой составляющей при охлаждении определяется температурами в диапазоне $T_k...T_d$ (точки k, d , рис. 3). Прекращение пластического деформирования и появление упругой деформации после прохождения равновесной точки d . Поэтому ни уровень остаточной деформации, ни уровень остаточных напряжений вследствие подогрева металла наплавкой последующего валика не изменяются.

Тем не менее, повторное нагревание и охлаждение твёрдого металла вблизи наплавочной ванны существенно увеличивает необратимую пластическую деформацию: $\varepsilon_p = \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2}$. При наплавке хрупких материалов это может привести к появлению горячих трещин по границам наплавленных валиков.

Математическая модель. Наплавляемый слой обычно имеют значительную протяжённость по отношению к размерам наплавочной ванны. Это позволяет не рассматривать распределение напряжений и деформаций вдоль валика и ограничиться рассмотрением его поперечного сечения.

Решение задачи о распределении напряжений и деформаций выполнили в декартовой системе координат y, z . Ограничились зоной размером $0...y_m, 0...z_m$, полностью охватывающей поперечное сечение валиков, зону термического влияния и часть металла слоя и подложки, нагревающуюся при сварке до температуры свыше значения, при котором возможно возникновение пластических деформаций.

Исходными данными для расчёта напряжённого состояния были распределение предельных значений температуры $T(y, z)$ в поперечном сечении и его формы, изменявшиеся при наплавке очередного валика.

Зона, занимаемая наплавляемым металлом, имеет разную геометрию и изменяется в ходе наплавки.

Так как рассматриваются наплавляемые валики значительной протяжённости, многократно превышающую их ширину, то можно принять, что продольное перемещение металла вдоль координаты x отсутствует. Соответственно в металле имеется упругая деформация, значение которой определяется по распределению предельных температур $T(y, z)$:

$$\varepsilon_x = \alpha(T(y, z) - T_a),$$

где T_a - температура, выше которой возникают пластические деформации и которая определяется при выполнении вариационной процедуры:

$$\sigma(T_a) \xrightarrow{T_a = \text{var}} \alpha T_a E(T_a).$$

Деформация вдоль валика сопровождается деформацией металла в поперечном сечении, которое вызывает перемещение точек этого сечения. Для расчёта этих перемещений u , w в направлении координат y , z решали систему уравнений совместности [5]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial w}{\partial z \partial y} = (1+\mu) \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial u}{\partial z \partial y} = (1+\mu) \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial z},$$

где $\mu = 0.3$ - коэффициент Пуассона.

Уравнения совместности деформаций решали при следующих граничных условиях. На границах, пересекающих сплошной металл, использовали линейную

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} + \mu \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \mu \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Напряжения в направлении координат рассчитывали по относительным деформациям и модулю упругости:

$$\sigma_x = \varepsilon_x \frac{E_0}{1-\mu^2}; \quad \sigma_y = \varepsilon_y \frac{E_0}{1-\mu^2}; \quad \sigma_z = \varepsilon_z \frac{E_0}{1-\mu^2};$$

$$\tau_{yz} = 0.577 \gamma_{yz} E_0; \quad \tau_{xy} = 0.577 \gamma_{xy} E_0; \quad \tau_{xz} = 0.577 \gamma_{xz} E_0,$$

где E_0 - модуль упругости при нормальной температуре.

При расчёте напряжений учитывали, что напряжения не могут превысить предел текучести σ_T , и их значения ограничи-

$$\sigma_M = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_z \sigma_y + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}.$$

При наплавке металл, прилегающий к следующему наплавляемому валику, повторно нагревается и охлаждается. Остаточная упругая деформация определяется как:

$$\varepsilon_{p,n}(y,z) = \sum_{i=1}^n \max(\varepsilon_{p,i}(y,z), \alpha(T_i(y,z) - T_a)); \quad T(y,z) < T_S,$$

где $\varepsilon_{p,i}(y,z)$ - распределение пластической деформации в поперечном сечении после наложения i -го валика.

Это учитывается при расчёте относительной деформации при наплавке следующего n -го валика:

экстраполяцию решения у пограничных поверхностей:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0.$$

На поверхностях соприкосновения металла с воздухом, где отсутствует сопротивление перемещению металла, приняли:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Относительные нормальные деформации ε_y , ε_z , в направлении координат и сдвиговые деформации γ_{yz} , γ_{xy} , γ_{xz} рассчитывали по распределению перемещений $u(y,z)$, $w(y,z)$:

$$\sigma = \min(|\sigma|, \sigma_T) \text{sign}(\sigma),$$

$$\tau = \min(|\tau|, 0.577 \sigma_T) \text{sign}(\tau).$$

Для оценки распределения максимального (суммарного) напряжения использовали критерий Мизеса:

$$\varepsilon_{n-1} = \max\left(\varepsilon_x, \frac{\sigma(T(y,z))}{E(T(y,z))}\right).$$

Общая пластическая деформация твёрдого металла после наложения n -го валика, рассчитывалась следующим образом:

$$\varepsilon_{x,n} = \max(\alpha(T(y,z) - T_b), \varepsilon_{n-1}).$$

Численное решение. Структура алгоритма численной оценки распределения деформаций и напряжений в поперечном сечении многоваликовой наплавки показана на рис. 4.

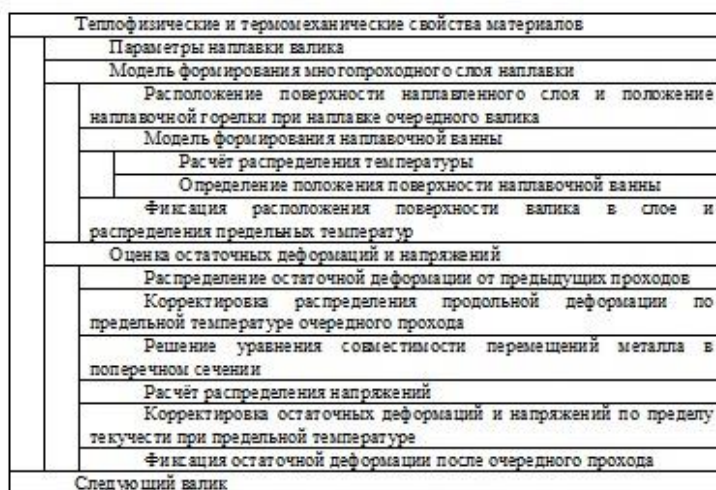


Рис. 4. Структура алгоритма численной оценки распределения деформаций и напряжений в наплавляемом слое

Fig. 4. Structure of the algorithm for numerical estimation of the distribution of deformations and stresses in the deposited layer

Особенностью алгоритма численного решения является последовательное считывание результатов моделирования формирования наплавочной ванны, которое определяет профиль поперечного сечения и валиков и распределение предельных значений температуры. Особенностью наплавки является различие зависимостей от температуры для модуля упругости $E(T)$, предела текучести $\sigma(T)$, коэффициен-

та линейного расширения α и теплопроводности λ в наплавляемом слое и подложке.

Численное решение системы уравнений перемещений для описанной модели деформации металла при наплавке выполнено методом конечных разностей на регулярной сетке итерационным методом Гаусса-Зейделя [6, 7].

Результаты расчёта деформаций и напряжений при последовательном наложении валиков

Для расчёта использованы результаты компьютерного моделирования формирования каждого валика многопроходной наплавки, при котором определили геометрическую форму поперечных сечений

слоя и распределение предельных температур сечениях после выполнения каждого из проходов [8] при наплавке сплава ХН75МБТЮ на поверхность стали 16ГС, рис. 5.

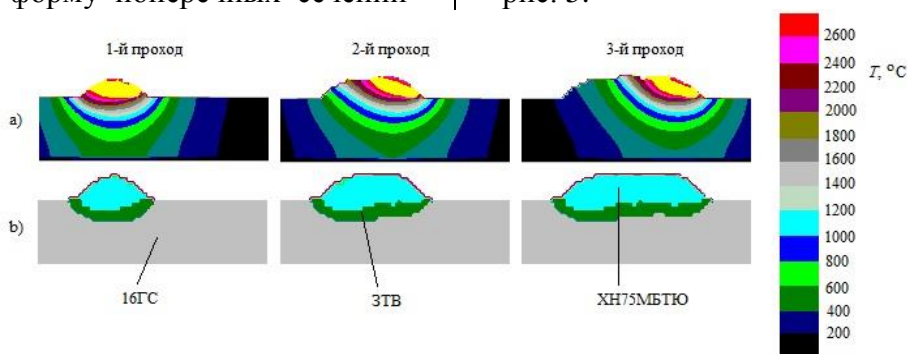


Рис. 5. Изменение распределения предельных температур (а) и формы наплавляемого слоя (б).

Режим наплавки: ток дуги 160 А, амплитуда поперечных колебаний 2.5 мм, скорость 5 мм/с

Fig. 5. Changing the distribution of limit temperatures (a) and the shape of the deposited layer (b).

Surfacing mode: arc current 160 A, amplitude of transverse oscillations 2.5 mm, speed 5 mm/s

Результаты расчёта остаточной относительной деформации при последовательной наплавке трёх валиков, рис. 5, показаны на рис. 6 и 7.

Результат расчёта показывает, что при наплавке никелевого сплава на низколегированную сталь уровень остаточных упругих деформаций в наплавленном слое

не превышает 1.5% и наиболее велик в зоне его сплавления с подложкой, где заметны сдвиговые деформации. Существенно большего значения достигают пластические деформации, которые достигают значений в 10...12 % в слоях сопряжения соседних валиков, где возникает дополнительная пластическая деформация при повторном нагревании твёрдого металла наплавленным валиком. Так как по-

лучаемое значение имеет для никелевого сплава тот же порядок, что и относительное удлинение образцов при испытаниях на растяжение, то вероятность возникновения дефектов металла наиболее велика в слоях сопряжения соседних валиков.

Изменение распределения остаточных напряжений по мере укладки валиков показано на рис. 7.

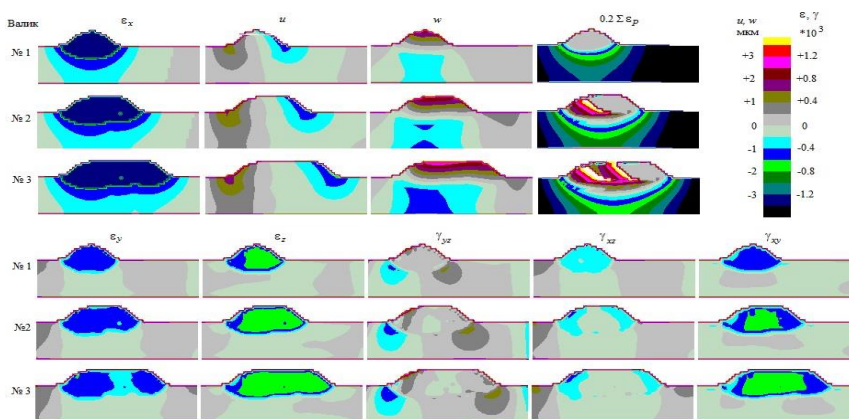


Рис. 6. Результаты расчёта распределения перемещений u , w , нормальных ε_x , ε_y , ε_z и сдвиговых γ_{yz} , γ_{xz} , γ_{xy} составляющих относительной остаточной деформации при последовательной наплавке трех валиков; $\sum \varepsilon_p$ – суммарная пластическая деформация
 Fig. 6. Calculation results of displacement distribution u , w , the distribution of normal ε_x , ε_y , ε_z and shear γ_{yz} , γ_{xz} , γ_{xy} components of the relative residual deformation during sequential surfacing of three rollers; $\sum \varepsilon_p$ – total plastic deformation

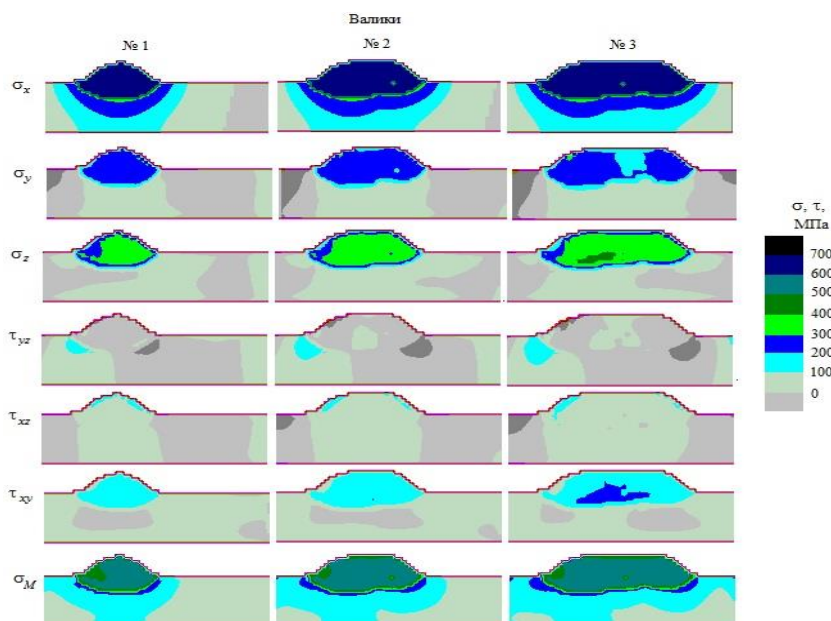


Рис. 7. Результаты расчёта распределения нормальных σ_x , σ_y , σ_z и сдвиговых τ_{yz} , τ_{xz} , τ_{xy} остаточных напряжений, их суммарное значение по критерию Мизеса σ_M при последовательной наплавке трех валиков
 Fig. 7. Calculation results of the distribution of normal σ_x , σ_y , σ_z and shear τ_{yz} , τ_{xz} , τ_{xy} residual stresses, their total value according to the Mises criterion σ_M for sequential surfacing of three rollers

При наплавке возникают преимущественно напряжения растяжения вдоль валков наплавляемого слоя, нормальные компоненты в поперечном сечении слоя заметно меньше. Заметна сдвиговая ком-

Обсуждение результатов

Предложенная процедура расчёта напряжённого состояния, возникающего при последовательном наложении валков при дуговой наплавке, основана на допущении, что термическая усадка при охлаждении металла не вызывает перемещения металла вдоль наплавленного валика. При этом допущении продольная деформация рассчитывается по значениям температурного коэффициента линейного расширения и предельной температуры в поперечном сечении, рис. 5. Расчёт показал, что эта деформация велика и возникающее продольное напряжение превышает предел текучести, что позволяет оценить уровень пластических деформаций (рис. 6). Последние определяют значение остаточных напряжений (рис. 7). При расчёте деформаций в поперечном сечении использовано решение уравнения совместимости перемещений, вызываемых продольной относительной пластической деформацией.

При многоваликовой наплавке металл, прилегающий к очередному наплавляемому валику, подвергается повторному нагреву (рис. 5). Это вызывает повторную пластическую деформацию металла в слое, прилегающем к соседнему валику, который наплавляется позднее. Это заметно увеличивает значение пластической деформации, которое достигает значений

Выводы

1. Предложена методика оценки напряжённого состояния и пластических деформаций в наплавленном слое, основанная на решении уравнения совместимости перемещений при допущении, что перемещения металла вдоль последовательно наплавляемых валков отсутствуют.

2. Показано, что при многоваликовой наплавке имеет место накопление пласти-

конента в плоскости поверхности подложки. Суммарное остаточное напряжение (по Мизесу) немного меньше предела текучести никелевого сплава.

10...12 %, рис. 6, что соизмеримо с максимально допустимой деформацией для наплавляемого материала. При последовательной наплавке валков и изменения распределения предельных температур возникает сложная картина напряжённого состояния металла в зоне выполнения наплавки. Остаточные напряжения в наплавляемом слое формируются на уровне, несколько меньше предела значения текучести при нормальной температуре, а максимальное их значение возникает в окрестности линии сопряжения валков с подложкой.

Особое значение имеет накопление пластических деформаций при повторном нагревании при наплавке последующих валков, значение которых в локальных зонах, расположенных в окрестности поверхностей сопряжения валков, может превысить относительное удлинение при испытаниях на разрыв. В таких зонах вероятно возникновение трещин и разрывов металла в наплавленном слое (рис. 1).

Описанная методика оценки уровня остаточных деформаций и напряжений при многоваликовой наплавке достаточно проста, что позволяет использовать её в инженерной практике при разработке технологии наплавки.

ческой деформации в слоях сопряжения наплавляемых валков, которое достигает значений, соизмеримых с относительным удлинением при испытаниях на растяжение. Это может быть причиной возникновения дефектов в наплавленном слое.

3. Возможно применение описанной методики в инженерной практике при разработке технологии наплавки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных напряжений и деформаций. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
2. Коновалов А.В., Смирнов А.С. Вязкопластическая модель сопротивления деформации стали 08X18N10T при температуре горячей деформации. *Металлы*. 2008. № 2. С. 55-59.
3. Биленко Г.А. Моделирование процессов сварки при помощи продуктов ESI Group (SYSWELD, PAM-ASSEMBLY). *САПР и графика*. 2010. №7. С. 1-3.
4. Касаткин О.Г., Зайффарт П. Интерполяционные модели для оценки фазового состава зоны термического влияния при дуговой сварке низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*. 1984. №1. С. 15-18.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды: учебник в 2-х томах. 6-е изд. СПб.: Лань, 2004. 528 с.
1. Vinokurov VA, Grigoryants AG. Theory of welding stresses and deformations. Moscow: Mashinostroenie; 1984.
2. Konovalov AV, Smirnov AS. Viscoplastic model of the deformation resistance of steel 08X18N10T at the temperature of hot deformation. *Metally*. 2008;2:55-59.
3. Bilenko GA. Modeling of welding processes using ESI Group products (SYSWELD, PAM-ASSEMBLY). *SAPR Journal*. 2010;7:1-3.
4. Kasatkin OG, Seiffart P. Interpolation models for estimating the phase composition of the zone of thermal influence during arc welding of low-alloy steels. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1984;1:15-18.
5. Sedov LI. *Continuum Mechanics*. 6th ed. St. Petersburg: Lan; 2004.
6. Самарский А.А., Лазаров Р.Д., Макаров В.Л. Разностные схемы для дифференциальных уравнений с обобщёнными решениями. М.: Высшая школа, 1987. 296 с.
7. Маквецов Е.Н. Модели из кубиков. М.: Советское радио, 1978. 192 с.
8. Шипилов А.В., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Компьютерный анализ технологий многопроходной орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов малых диаметров. *Сварка и диагностика*. 2011. № 6. С. 26-31.
9. Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.С. Физико-математическая модель дугового взаимодействия при наплавке плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой. *Сварка и диагностика*. 2019. №6. С.27-31. ISSN 2071-5234.
6. Samarskiy AA, Lazarov RD, Makarov VL. Difference schemes for differential equations with generalized solutions. Moscow: Higher School; 1987.
7. Makvetsov EN. Cube models. Moscow: Sovetskoe Radio; 1978.
8. Shipilov AV, Erofeev VA, Poloskov SI. Computer analysis of technologies of multi-pass orbital welding with a non-melting electrode of small diameter pipelines. *Welding and Diagnostics*. 2011;6:26-31.
9. Sholokhov MA, Erofeev VA, Poloskov SS. Physical and mathematical model of arc interaction during surfacing with a melting electrode and an additional filler wire. *Welding and Diagnostics*. 2019;6:27-31.

Информация об авторах:

Ерофеев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, тел. 89028414595, профессор кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов» Тульского государственного университета.

Полосков Станислав Сергеевич, магистр, тел. 89030143357, директор Аналитического центра

Erofeev Vladimir Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, Foundry and Technology of Structural Materials at Tula State University, phone: 89028414595.

Poloskov Stanislav Sergeevich, Master, Director of the Analytical Center at Moscow Institute of Physics and Technology, phone: 89030143357.

Московского физико-технического института (НИУ).

Страхова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов» Тульского государственного университета, тел. 89056272384.

Strakhova Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, Foundry and Technology of Structural Materials at Tula State University, phone: 89056272384.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 22.03.2021; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 21.03.2022. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 21.12.2021; approved after review on 19.01.2022; accepted for publication on 21.03.2022. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.