



МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ*

У. ЗЕММЛЕР, К. АЛАЛУСС, К.-Й. МАТТЕС (Ин-т технологий обраб. и сварки, Технолог. ун-т, г. Хемниц, Германия)

Изучен процесс плазменной наплавки дугой прямого действия (РТА) твердых износостойких сплавов V12 и V18 на основе ванадия на конструкционную сталь S35J0. Различия в термомеханических свойствах, локальных термопластических деформациях и фазовых превращениях материалов могут вызвать высокие остаточные напряжения и деформации. Сравниваются результаты моделирования с измерениями распределения температуры и деформаций. Проверенные и улучшенные модели на основе метода конечных элементов можно использовать для изучения влияния параметров сварки на деформации и остаточные напряжения в изделиях с целью оптимизации их качества.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, конструкционная сталь, сплавы на основе ванадия, остаточные напряжения, деформации, моделирование, термомеханические параметры, экспериментальные измерения

Благодаря своей прочности в условиях высоких температур стеллит широко используется для наплавки формовочного инструмента, работающего при температуре свыше 600 °С. В работе [1] представлены данные о моделировании методом конечных элементов процесса плазменной наплавки дугой прямого действия (РТА) применительно к формовочному инструменту. Подробно рассмотрены модели на основе метода конечных элементов и приведены результаты численного моделирования, которые сравниваются с экспериментальными данными.

Помимо стеллитов, отличным материалом для износостойкой наплавки являются сплавы на основе железа со значительным (12... 18 мас. %) содержанием ванадия, имеющие высокую твердость. Поскольку они не отличаются прочностью в условиях высоких температур, то в основном применяются для изделий, работающих при низких или умеренных температурах, например, при изготовлении ножей длиной до 4 м для резки бумаги, переработки отходов промышленности, в частности костей. На рис. 1 представлена схема поперечного сечения заготовки такого ножа с канавкой. Поскольку режущие кромки ножа подвергаются значительному износу, канавку делают шириной 30 мм. При РТА она заполняется одним слоем материала (сплавом V12 или V18) на глубину 4 мм. Этот процесс исследовали экспериментальными методами и с использованием численного моделирования. При этом нас интересовали остаточные напряжения, являющиеся причиной зна-

чительной деформации как по толщине V_t , так и по ширине V_b режущей кромки ножа (рис. 2). Для ножей очень большой длины остаточная деформация по ширине V_b кромки может превышать 30 мм. В таких случаях наплавленный слой полностью снимается при повторной механической обработке.

Для получения наплавки с низкими деформацией и остаточными напряжениями необходимо знать размер сварочной ванны, а также теплофизические и механические характеристики металла в процессе наплавки, термообработки и конечной механической обработки. Эти характеристики и их взаимосвязь, а также процессы и свойства

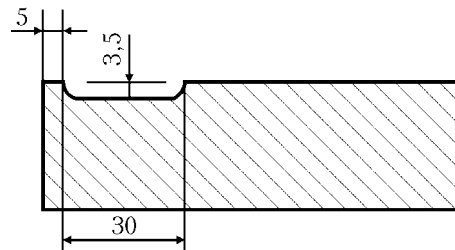


Рис. 1. Схема типичного поперечного сечения заготовки ножа с канавкой

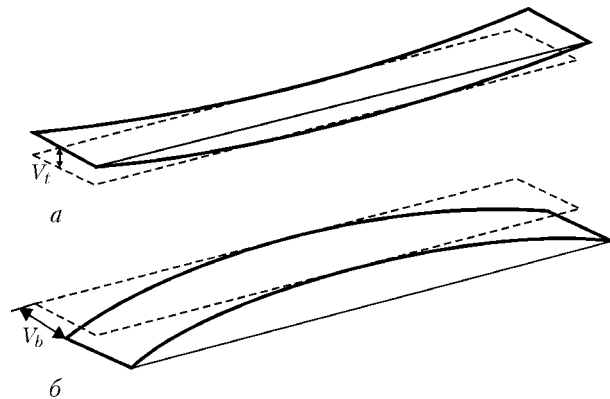


Рис. 2. Остаточные деформации по толщине V_t (а) и ширине V_b (б) кромки ножа

*По материалам Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым, Украина).



материалов в зависимости от температуры можно исследовать с помощью численного моделирования по методу конечных элементов. Для этого необходимо знать основные термомеханические и теплофизические процессы, происходящие при наплавке, и уметь их моделировать, учитывая существенные и не принимая во внимание несущественные физические взаимодействия, а также использовать соответствующие методы для расчета значимых параметров процессов с помощью моделей.

В настоящей работе представлены модели на основе метода конечных элементов, используемые для расчета деформаций и остаточных напряжений, возникающих при наплавке. Расчетные значения указанных величин сравниваются с результатами экспериментальных исследований. Целью некоторых экспериментов было уточнение неизвестных или недостаточно известных параметров моделей.

Моделирование процесса наплавки по методу конечных элементов. Термомеханическая модель. Распределение температуры описывается следующим нестационарным и нелинейным уравнением теплопроводности и конвекции:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - \nabla(c\rho \vec{v} T) + q_{vol}. \quad (1)$$

Для ножей большой длины в случае, если конвекция в сварочной ванне (в уравнении выражена условием конвекции) не учитывается и тепловой источник движется прямолинейно с постоянной скоростью v_s , уравнение теплопроводности и конвекции можно записать в подвижной системе координат:

$$c_p \rho v_s \frac{\partial T}{\partial x} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_{vol}. \quad (2)$$

Аналитические решения на основе уравнения (2) применяются для уточнения тепловых граничных условий [1]. Кроме того, сокращается трудоемкость вычислений с применением моделей на основе метода конечных элементов. Однако расчет распределения температуры с применением (2) требует решения задачи в подвижной системе координат, что затрудняет расчет реальных деформаций.

Поэтому все эксперименты с термомеханическими моделями выполняются с использованием (1) неподвижной системы координат без учета условий конвекции (конвекция в жидкой ванне приближенно моделируется с помощью искусственного повышения коэффициента теплопроводности).

Предположим, что все материалы считаются однородными, изотропными и их теплофизические параметры (λ и ρc) зависят от температуры. При этом рассматриваются следующие тепловые граничные условия.

1. Плазменную дугу моделируют как подвижный эллиптический источник с гауссовым распределением энергии (источник тепла Гольдака [2]). Поскольку наплавляемый слой имеет большую толщину, объемный источник тепла Гольдака в большей степени соответствует реальному процессу (низкая скорость наплавки предполагает одинаковое распределение тепла как в головной, так и в хвостовой части подвижного источника тепла):

$$q_{vol} = q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \times \times [\exp(-3x^2/a^2)] [\exp(-3y^2/b^2)] [\exp(-3z^2/c^2)]. \quad (3)$$

В случае наплавки с поперечными колебаниями горелки последняя перемещается в направлении наплавки (по оси y) со скоростью $v_s \cong 1 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ и в поперечном направлении с максимальной скоростью $v_W = 7 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ при амплитуде колебаний $W = 28 \text{ мм}$. Периодическое перемещение при поперечных колебаниях составляет $x_W(t)$. Поскольку источник тепла колеблется со скоростью v_W , большей чем скорость наплавки v_s , в подвижной системе координат его можно считать стационарным. В этом случае он определяется путем усреднения за один период колебания маятника $1/f$:

$$q_{vol} = q(x, y, z) = \int_0^{1/f} q_{lin}(x + x_W(t), y, z) dt. \quad (4)$$

Как показано на рис. 3, плотность источника тепла является максимальной с обеих сторон шва, поскольку маятниковое движение горелки изменяет его направление в этих положениях; кроме того,

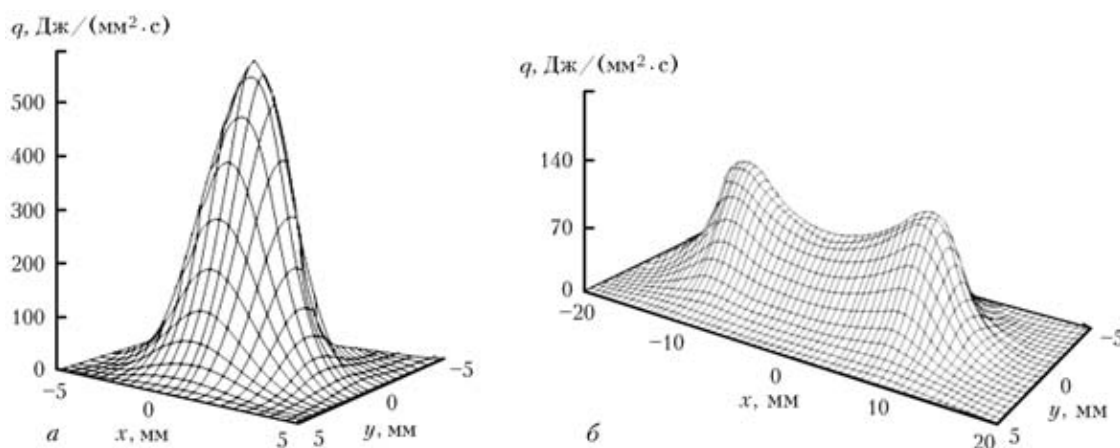


Рис. 3. Распределение тепловой мощности для наплавки линейной (а) и с поперечными колебаниями горелки (б) со скоростью $7 \text{ мм}/\text{с}$ при $W = 28 \text{ мм}$, задержка во времени составляет $0,6 \text{ с}$



в этих точках наблюдается определенная задержка во времени.

2. Со всех сторон образца перенос тепла определяется излучением и конвекцией в окружающую среду:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \epsilon C_0(T - T_0)^4, \quad (5)$$

где излучение имеет значение только для верхней поверхности образца. Таким образом, значение коэффициента черноты ϵ на других границах устанавливаются равным нулю.

Суммарный тепловой поток Q определяют с помощью экспериментально измеренных значений тока сварки, напряжения на дуге и скорости сварки с учетом теплового КПД. Параметры материала в зависимости от температуры применяют в соответствии с работами [3, 4]. В качестве основного материала используют конструкционную сталь S355J0 следующего химического состава, мас. %: $\leq 0,2$ C; 1,14 Mn; 0,012 P; 0,007 S; остальное Fe. Химический состав присадочных материалов сплавов V12 и V18 представлен в таблице.

Присадочный материал	C	Cr	Mo	Ni	Si	V	HRC
V12	2,8	4,5	1,3	0,4	0,9	12,0	62
V18	4,0	4,5	1,3	0,4	0,9	18,0	64

Примечание. Основа железо.

Распределение температуры в образцах существенно зависит от коэффициента теплопередачи от образца к столу, на котором располагается сварочное оборудование. Контакт между этими двумя поверхностями является неполным, в литературе данные об этом отсутствуют. Поскольку выполнить измерения сложно, их результаты обычно бывают неточными. В связи с этим температуру измеряли с использованием термопары, а затем с помощью специально разработанной простой стационарной модели на основе метода конечных элементов, значения параметров Q и α уточняли по полученным значениям температуры [1].

Изменение временных тепловых упругопластических деформаций на всех этапах термического цикла вычисляли с учетом расчетных значений температуры и фазового состава металла в течение всего указанного временного интервала. Поскольку

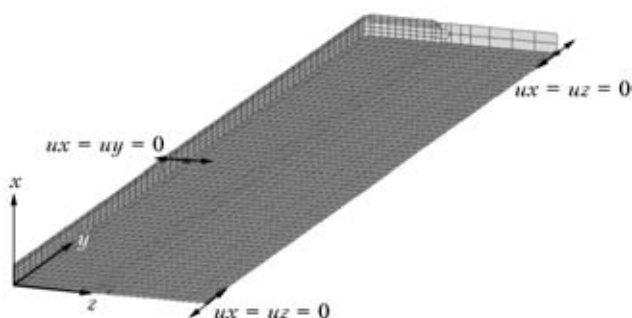


Рис. 4. Граничные условия устойчивости для численной модели

при экспериментах закрепление изделий было неполным, рассматривали только те граничные условия, которые обеспечивали устойчивость модели (при этом при использовании численной модели исключалось движение жесткозакрепленного тела) (рис. 4).

Общая деформация состоит из упругих, пластических, тепловых деформаций и деформаций, вызванных фазовыми превращениями:

$$d\epsilon_{ij}^{sum} = d\epsilon_{ij}^{el} + d\epsilon_{ij}^{pl} + d\epsilon_{ij}^{th} + d\epsilon_{ij}^{tr}. \quad (6)$$

Для расчета пластических деформаций применяется теория пластического течения с использованием изотропных многолинейных и зависящих от температуры кривых текучести, построенных для рассматриваемых материалов. В стали и присадочных материалах аустенитно-ферритные превращения сопровождаются объемными изменениями. Последние являются причиной дополнительных деформаций, из-за которых возникают дополнительные остаточные напряжения. Таким образом, для учета влияния структурных превращений в численную модель необходимо включить данные из термокинетических диаграмм. Термокинетическая диаграмма сварки для стали S355J0 взята из работы [5], для сплава V12 ее строили на основании результатов измерений (рис. 5). При любой скорости охлаждения температура начала мартенситного превращения составляет $M_s = 200$ °C. При температуре окружающей среды остаточное содержание аустенита равно приблизительно 30 мас. %.

Что касается данных о реальных теплофизических параметрах материалов, работающих в условиях высоких температур, близких к температуре плавления, то их едва ли можно найти в литературе и сложно получить путем измерений. Разные фазы материала могут иметь различные теплофизические и механические параметры. Исходя из этого для температуры, выше температуры плавления, нами выбрано очень низкое значение предела текучести.

Модель на основе метода конечных элементов и ее численная реализация. Сетка конечных элементов для заготовки ножа, предназначенного для вырезки отверстий, включая наплавленный слой, состоит приблизительно из 7900 восьмиузловых

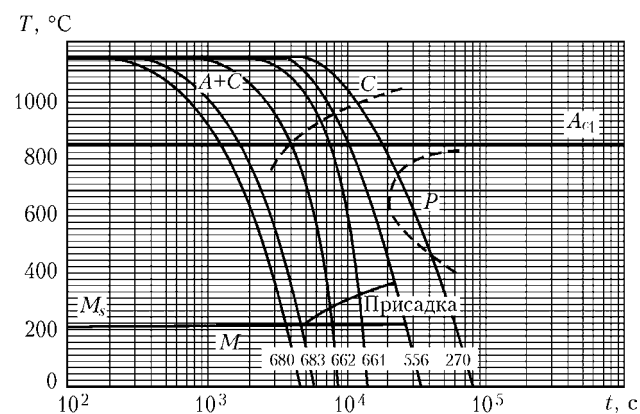


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма, построенная на основании результатов измерений для присадочного материала сплава V12

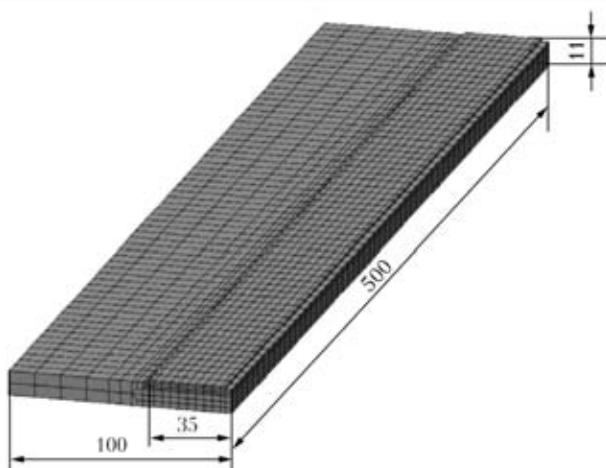


Рис. 6. Сетка конечных элементов, построенная для заготовки ножа размером 500×100×10 мм

элементов (рис. 6). Моделирование и расчеты выполняли с использованием программы FE Code SYSWELD™ [6].

Данная модель используется для исследования и оптимизации влияния распределения энергии горелки, скорости сварки, условий закрепления и теплового режима на остаточные деформации V_t и V_b ножей. Основное внимание в настоящей работе уделено исследованию влияния геометрии ножей (поперечное сечение и длина) на деформации. Для этого базовое сечение заготовки (100×10 мм) масштабировали по глубине (10, 15, 20 и 30 мм) и ширине (60, 100 и 160 мм). На рис. 7 показаны схемы сечения заготовки ножа, используемые в указанной модели. Количество элементов модели для поперечных сечений не менялось. Удлинение от 500 до 1000 и 2000 мм получали путем повторения сетки по оси и увеличения в 2 и 4 раза количества элементов модели.

В начале численной обработки рассматривали весь нестационарный металлургический цикл — от начала наплавки до конца охлаждения, а затем на основе расчетного распределения нестационарной температуры и фазового состава исследовали развитие тепловых упругопластических напряжений и деформаций. Появление нового материала в наплавленных слоях моделировали с помощью программы SYSWELD посредством активации элементов в процессе вычислений (использование так

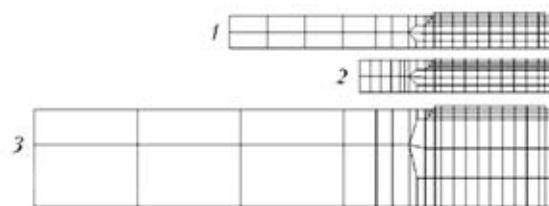


Рис. 7. Схемы сечения заготовки ножа, используемые в модели на основе метода конечных элементов: 1 — базовое (100×10 мм); 2 — минимальное (60×10 мм); 3 — максимальное (160×30 мм)

называемых элементов рождения и гибели). В расчетах учитывались происходящие структурные превращения (термокинетические диаграммы) и зависимость термомеханических свойств материала от его фазового состава.

Результаты численного моделирования. После кристаллизации наблюдается усадка наплавленного материала, появление растягивающих напряжений, что приводит к образованию вогнутости по толщине V_t и перпендикулярно ей V_b . В отличие от сплавов на основе хрома и никеля (например, стеллит и сплав Ni625), исследуемые присадочные материалы на основе ванадия подвержены мартенситным превращениям при температуре 200 °С (см. рис. 5) с объемным расширением приблизительно на 1 %. При численном моделировании учитывается кинетика этих превращений, которые вызывают расширение при охлаждении и приводят к образованию напряжений сжатия в наплавленных валиках. У ножей толщиной 10 мм (а частично и 15 мм) при охлаждении до температуры ниже температуры начала мартенситного превращения сжимающие напряжения вызывают изменение формы — из вогнутой в выпуклую. На рис. 8 показано распределение температуры и развитие деформаций при наплавке способом РТА через 150, 400, 500 (конец наплавки) и 2000 с (практически полное охлаждение до температуры окружающей среды).

Диапазон значений продольных напряжений находится в пределах от -328 (для максимальных сжимающих напряжений в шве) до 440 МПа (для максимальных растягивающих напряжений в зоне термического влияния) (рис. 9).

С помощью закрепления заготовки и правки можно относительно легко исключить появление

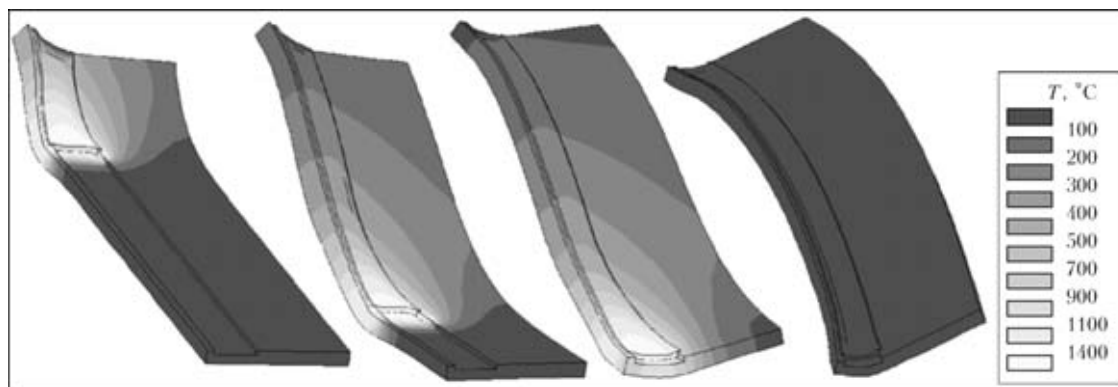


Рис. 8. Распределение температуры и развитие деформаций в ноже размером 500×100×10 мм при наплавке способом РТА и скорости 1 мм/с (×20)

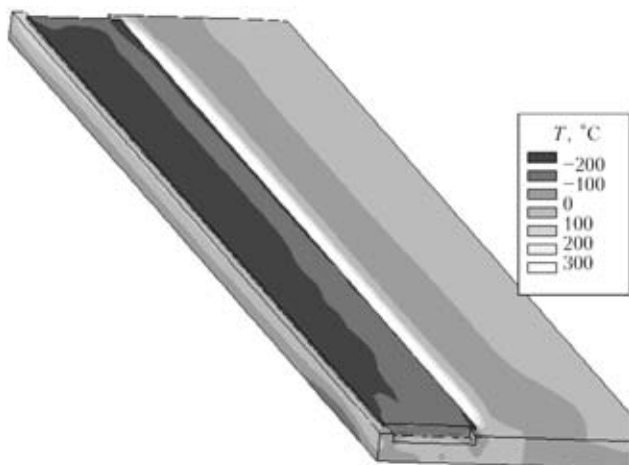


Рис. 9. Распределение остаточных продольных напряжений в заготовке ножа после полного охлаждения изделий

деформации по толщине V_t , однако деформацию по ширине V_b устранить гораздо сложнее. На рис. 10 сопоставляются экспериментальные и рассчитанные методом конечных элементов деформации V_b в изделиях длиной 500 мм. При этом используют два способа наплавки РТА — на постоянном и импульсном токе. При импульсном токе требуется меньшая затрата энергии на расплавление определенного количества наплавляемого материала. Образующиеся при этом деформации имеют меньшие значения. Источник питания, рассматриваемый в модели на основе метода конечных элементов, настраивают на импульсный режим. Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными значениями деформаций, однако для определения количественных отклонений необходимы дальнейшие исследования.

В связи с возможной вероятностью образования деформаций более 30 мм обработка ножей может привести к полному исчезновению наплавленного валика, а следовательно, к отбраковке детали. Поэтому важно заранее определить ожидаемые значения деформаций V_b , зная которые можно обеспечить компенсацию деформаций за счет предварительного изгиба заготовки или путем наплавки криволинейного валика.

Время расчета на персональном компьютере при скорости срабатывания процессора составляет приблизительно 5 ч при использовании основной модели для ножа длиной 500 мм (7900 элементов) и до 3 дней для ножа длиной 2000 мм. Для ножей большей длины время расчета неприемлемо долгое. Используя экспериментальные и расчетные результаты для коротких образцов (например, длиной $l_0 = 500$ мм), можно рассчитать деформации для образцов большой длины ($l \gg l_0$), умножив их на коэффициент f . На рис. 11, а представлено изменение деформаций V_b для ножей разной длины с базовым сечением. Масштабирование длины ножей при коэффициенте $f_1 = l/l_0$ и деформаций при $f = (l/l_0)^{3/2}$ обеспечивает достаточно хорошее приближение ожидаемых значений деформаций (рис. 11, б).

Примеры практического применения и выводы. Практическое применение моделирования при

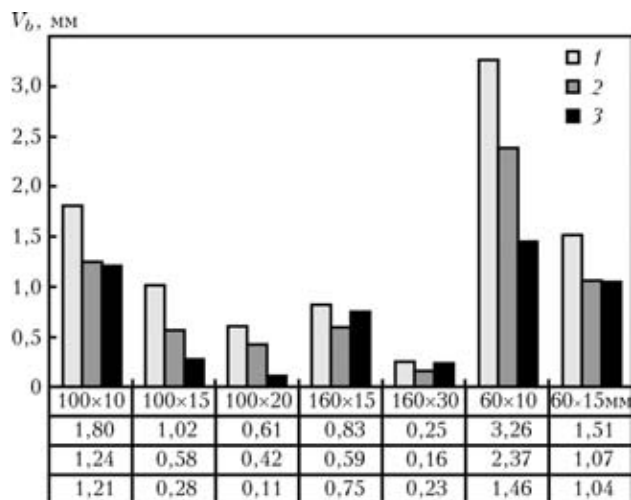


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные деформации V_b (мм) по ширине ножа в сечениях различных размеров, полученные при наплавке способом РТА на постоянном (1), импульсном токе (2) и методом конечных элементов (3)

наплавке валков стана поперечной прокатки описано в работе [1]; еще один пример наплавки узких и длинных ножей представлен на рис. 12. Во втором случае моделируемые деформации качественно совпадают с экспериментальными результатами. Моделирование дает возможность исследовать влияние геометрических параметров сварки и ее различных режимов на деформацию изделия, а также оценить деформации, возникающие в изделиях большой длины, и при этом

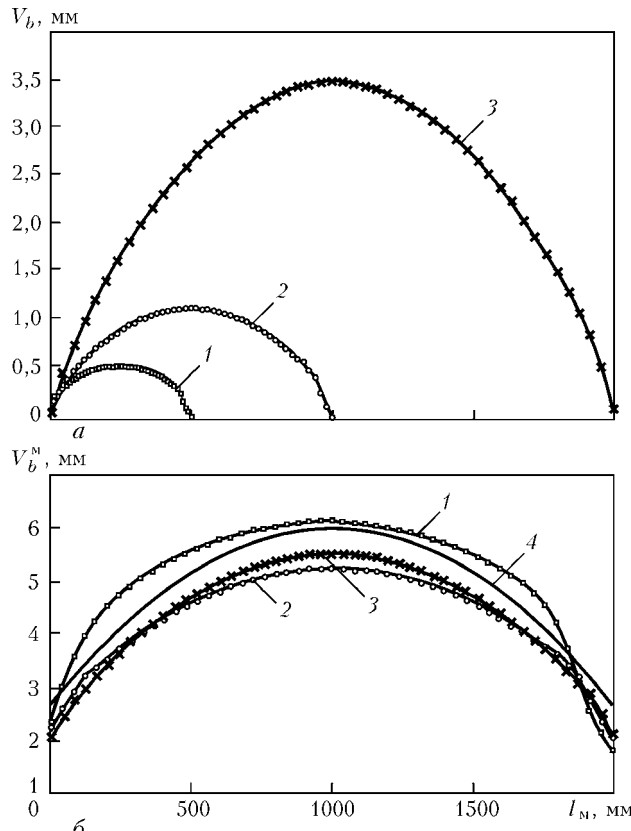


Рис. 11. Изменение расчетных деформаций V_b в сечениях ножей различной длины с базовым сечением размером 100×10 мм: а — реальные деформации; б — масштабированные; 1 — $l = 500$; 2 — 1000; 3 — 2000 мм; 4 — наилучшая круговая аппроксимация

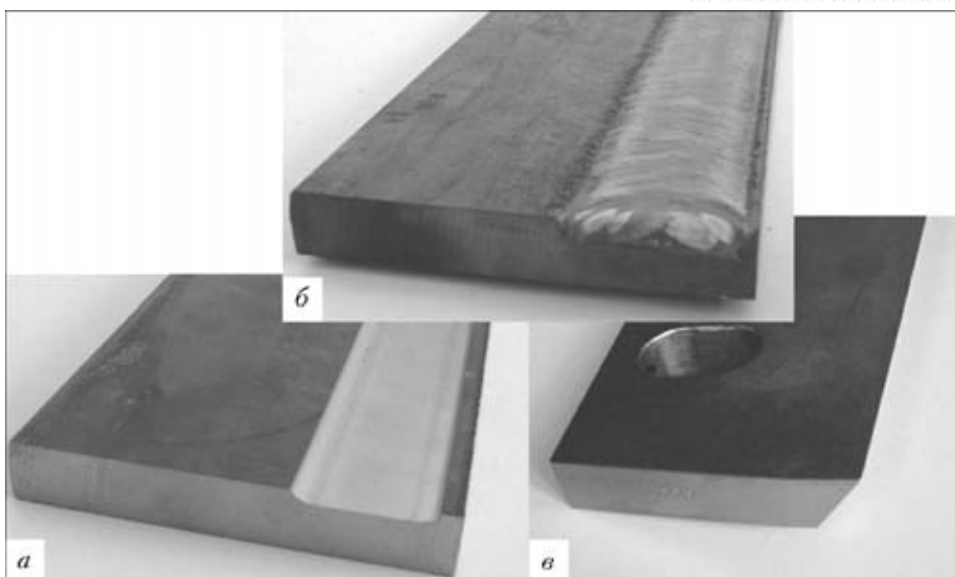


Рис. 12. Внешний вид заготовки ножа до наплавки (а), после наплавки (б) и механической обработки (в)

получить достоверные результаты для коротких ножей. На основании данных об ожидаемой деформации по ширине ножа большой длины можно предусмотреть выполнение криволинейного шва с тем, чтобы после понижения до температуры окружающей среды получить прямолинейный шов, что дает возможность сократить операцию по повторной механической обработке.

Причина остальных количественных отклонений в значениях деформаций заключается в недостатке данных о реальных характеристиках материалов таких, как кинетика фазовых превращений и зависимость параметров от фазового состава и температуры (близкой к температуре плавления или выше). Уменьшение этих отклонений будет целью дальнейших исследований.

Еще одним примером целесообразности моделирования методом конечных элементов процесса наплавки РТА является его использование при изготовлении матрицы для центробежной экструзии и клапанов больших дизельных двигателей.

Представленные теоретические и экспериментальные исследования проведены благодаря поддер-

жке Федерального Министерства экономики и труда Германии (проект AiF № 12793 BR), а также Научно-исследовательского общества Германии (программа специальных научных исследований № 283 «Последовательность выполнения технологических операций при объемной формовке»).

1. Semmler U., Alaluss K., Matthes K.-J. Finite element analysis of the PTA welding with applications to hardfacing // Proc. of 1st Intern. conf on mathematical modelling and information technologies in welding and related processes, Katsiveli, Crimea, Ukraine, Sept. 16–20, 2002. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2002. — P. 243–248.
2. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources // Metallurg. Transact. B. — 1984. — **15**. — P. 299–305.
3. Richter F. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Stählen und ihre Temperaturabhängigkeit // Stahleisen Sonderberichte. — 1983. — **14**, № 10.
4. Touloukian Y. S. Thermophysical properties of materials. — New York, 1979. — Vol. 14.
5. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Großer Atlas der Schweiß-ZTU-Schaubilder. — Dusseldorf: DVS-Verlag, 1992.
6. (2000-2004) SYSWELD™ Manuals. — <http://www.esi-group.com>.

The process of plasma transferred arc (PTA) surfacing of hard wear-resistant vanadium-based alloys V12 and V18 on base metal of structural steel S35J0 has been studied. Differences in thermomechanical properties, local thermoplastic deformations and phase transformations of materials can lead to high residual stresses and strains. Results of simulation with measurement of temperature and deformation distribution have been studied. Verified and improved models based on finite elements can be used to study the influence of welding parameters on deformations and residual stresses to optimize the welded products.

Поступила в редакцию 18.05.2005