

УДК 621.691.052:539.4

А. В. Коновалов

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОСЛОЙНОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВАРИВАЕМОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрен современный подход к определению оптимальных значений технологических параметров многослойной сварки. Обсуждены вопросы формализации объекта проектирования. Представлен алгоритм комплексного анализа технологических вариантов сварки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов. Сформулирована математическая постановка задачи проектирования и предложен алгоритм процедуры синтеза проектного решения применительно к способу сварки в среде защитных газов.

В настоящее время в области свариваемости низколегированных сталей (НЛС) накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал. Тем не менее, обеспечение достаточной свариваемости НЛС по-прежнему является сложной технологической задачей. Наиболее опасным проявлением недостаточной свариваемости НЛС являются холодные трещины (ХТ). Значительные трудности вызывает обеспечение заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств различных зон сварного соединения.

Накопленный опыт свидетельствует, что существенные резервы обеспечения свариваемости НЛС скрыты в правильном выборе теплового режима сварки и сварочных материалов. Однако отсутствие научно обоснованной методики такого выбора не позволяет эффективно использовать указанные резервы и приводит к применению традиционных решений — подогрев, последующий отпуск сварных конструкций — либо к применению сварочных материалов аустенитного класса, хотя существует принципиальная возможность достижения положительного результата при использовании более дешевых сварочных материалов перлитного класса.

Не в полной мере для обеспечения свариваемости НЛС используются потенциальные возможности многослойной сварки по управлению процессами формирования структуры и свойств сварного соединения. Сам процесс разработки технологии сварки НЛС остается трудоемким

и длительным. Принятие решений относительно режимов и последовательности укладки швов, выбора сварочных материалов, назначения подогрева и других осуществляется на основе личного опыта разработчиков и результатов многочисленных экспериментов. Прогрессивные методы проектирования технологии сварки на основе компьютерного моделирования используются явно недостаточно. Перечисленные недостатки в значительной мере объясняются сложностью и большим числом взаимосвязанных процессов, протекающих в сталях при многослойной сварке, неоднозначной зависимостью показателей свариваемости от параметров технологии сварки. Совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.

Технология сварки как объект проектирования. Проектирование технологии сварки заключается в выборе способа сварки, сварочных материалов, определении параметров режима и условий сварки, а также дополнительных технологических мероприятий, обеспечивающих требуемое качество сварного изделия и необходимые технико-экономические производственные показатели. В техническом задании (ТЗ) обычно оговаривается перечень и диапазон допустимых значений показателей качества сварного соединения в виде технических требований (ТТ).

Применительно к сварке НЛС обычно регламентируются показатели сплошности, геометрические характеристики и комплекс механических свойств различных зон сварного соединения; технико-экономические показатели и другие требования, отражающие специфику конкретного производства: имеющиеся производственные мощности, санитарно-гигиенические нормы, отраслевые нормы и т.п.

В основе проектирования обычно заложен принцип оптимизации — выбора наилучшего по какому-то критерию варианта из всех допустимых по ТЗ решений. Для компьютерного проектирования необходима формализация объекта в виде адекватной математической модели (ММ), определение набора критериев качества объекта, выбор управляемых параметров, системы ограничений и целевой функции.

Формирование модели на основе системного анализа. Математическая модель вида $Y = M(X)$ является математическим аналогом объекта. Под оператором понимается полная система операций, описывающая численные и логические отношения между вектором входных параметров X и вектором выходных параметров Y (рис. 1). Подоб-

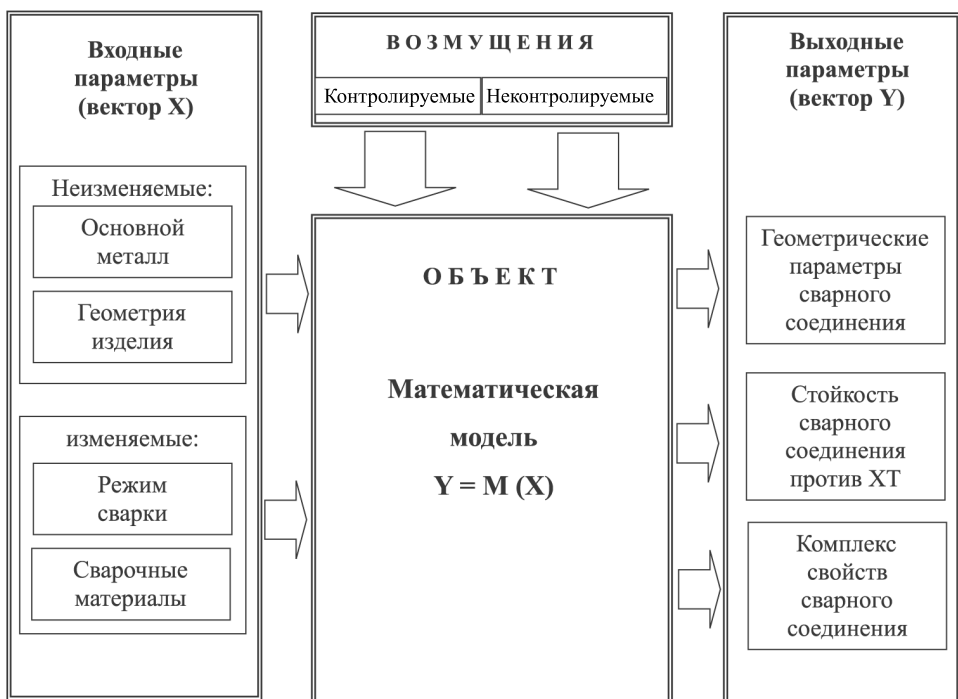


Рис. 1. Технология сварки как объект проектирования

ные модели решают задачу анализа, т.е. позволяют получать значения показателей Y при заданном наборе входных параметров X . Корректность анализа определяется степенью адекватности модели исследуемому объекту.

Анализ взаимосвязей процессов, протекающих в НЛС при сварке и определяющих формирование показателей свариваемости (рис. 2), показывает, что эти взаимодействия могут быть описаны ветвящейся структурой с обратными связями. Наличие обратных связей требует совместного рассмотрения процессов, что приводит к усложнению модели. Для принятия обоснованного решения об упрощениях модели необходим дополнительный анализ существенности выявленных обратных связей.

Обратное влияние структурных превращений на протекание тепловых процессов связано с изменением теплофизических свойств материала при превращениях, а также с тепловыми эффектами этих превращений. Эти эффекты ощутимы и определяют, в частности, влияние шва на показатель сопротивляемости околшовной зоны (ОШЗ) сварного соединения образованию ХТ [1]. Учет этой взаимосвязи возможен прямо (путем совместного решения температурной и структурной задач), либо косвенно (через эталонные материалы).

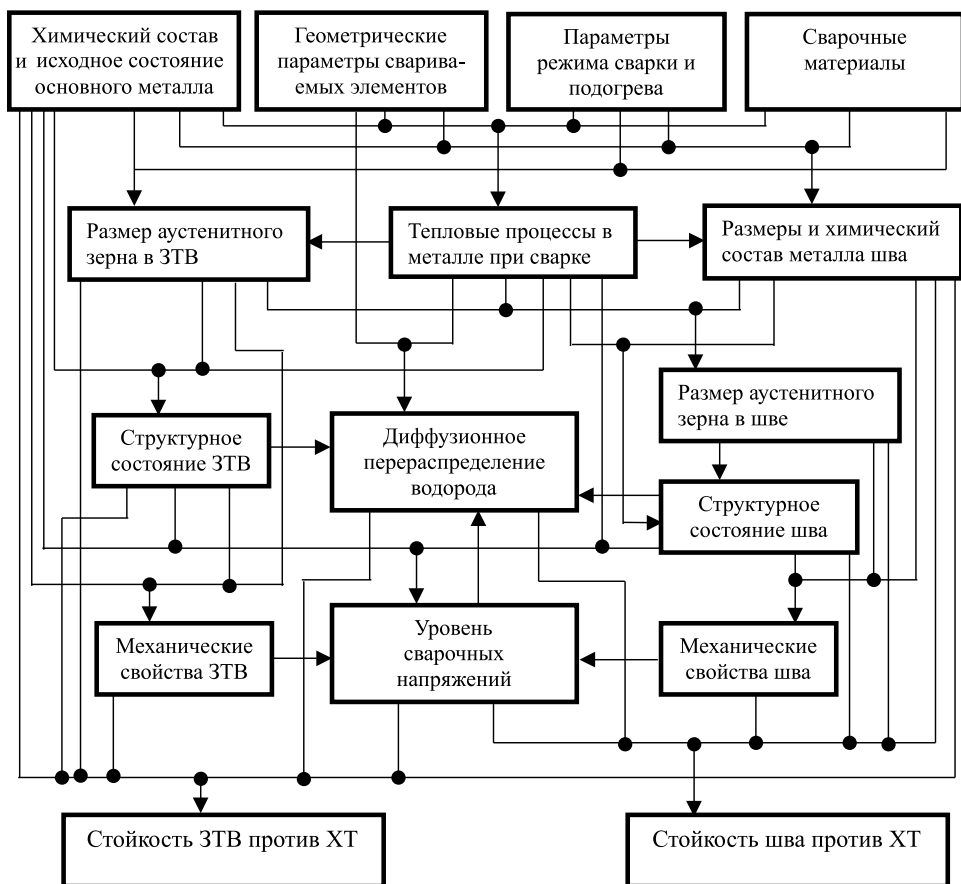


Рис. 2. Схема взаимосвязей показателей свариваемости НЛС с процессами, протекающими в металле при сварке

Если подходы к учету влияния структурных превращений на напряженно-деформированное состояние (НДС) хорошо известны (через величину фазовой дилатации и свойства материала), то количественное описание обратного влияния не позволяет учесть его в должной мере. По той же причине не учитывается влияние НДС на диффузию водорода (рис. 2).

В результате принятых допущений в ММ отсутствуют обратные связи, и моделирование сводится к последовательному анализу процессов в порядке, определенном структурой связей на рис. 2. В условиях многослойной сварки НЛС взаимосвязи между отдельными процессами при выполнении каждого прохода сохраняются. Для уменьшения трудоемкости ММ возможно рассмотреть формирование показателей свариваемости не во всем объеме изделия, а лишь в наиболее опасной с точки зрения образования ХТ ОШЗ сварного соединения, положение которой может быть заранее определено (рис. 3).

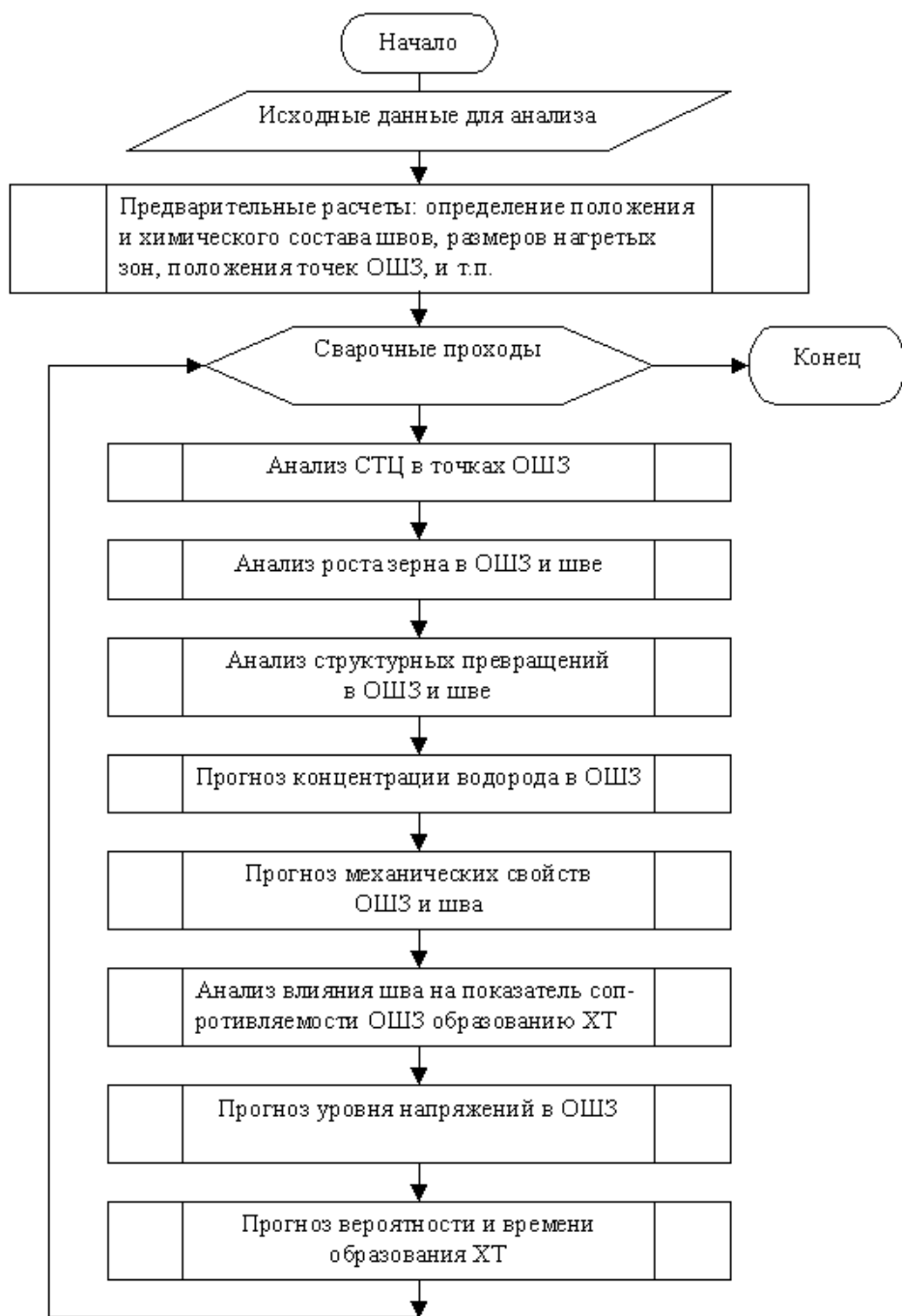


Рис. 3. Алгоритм анализа процессов формирования показателей свариваемости НЛС при многослойной сварке

Компьютерная реализация ММ должна быть пригодна для решения оптимизационных задач (т.е. требовать минимальные вычислительные ресурсы), поэтому в ней по возможности были использованы анали-

тические методы и максимально эффективные алгоритмы. Благодаря этому время анализа одного технологического варианта сварки, требующего выполнения 40 проходов, составляет доли секунды при использовании современных ПЭВМ. На основе разработанной ММ был создан инженерный программный комплекс “Свариваемость легированных сталей” [2, 3].

Математическая формулировка цели проектирования. Как правило, целью проектирования технологии сварки является достижение наилучших технико-экономических показателей сварочного производства при обязательном условии обеспечения требуемого уровня качества изделия. Поскольку выполнение комплекса ТТ является непременным условием пригодности проектного решения, то степень выполнения каждого из условий работоспособности вида $y_j < TT_j$ должна учитываться при вычислении целевой функции. Для этого целесообразно использовать безразмерные величины, учитывающие разброс выходных параметров объекта [4]:

$$z_j = a_j \left(\frac{TT_j - y_j}{\delta_j} - 1 \right),$$

где z_j — запас работоспособности по j -му выходному параметру; a_j — коэффициент, отражающий важность выходного параметра; TT_j — нормативное значение выходного параметра; y_j — текущее значение выходного параметра; δ_j — величина, характеризующая разброс выходного параметра.

Максимизация минимальной из оценок Z_j повышает вероятность выполнения того из условий работоспособности, которое характеризуется в данный момент наименьшей вероятностью выполнения [4]. Таким образом, синтез параметров технологии сварки НЛС сводится к следующей математической формулировке: для объекта, описываемого моделью $Y = M(X)$, определить такой вектор входных параметров X^* , лежащий в области допустимых решений X_D , чтобы, во-первых, достичь максимума целевой функции минимального запаса работоспособности и, во-вторых, обеспечить в δ -окрестности точки X^* , определяемой возможными возмущениями по входным параметрам, устойчивое по выходным параметрам состояние:

$$\begin{cases} F(X^*) = \max_{X \in X_D} \min_{j=[1:m]} Z_j; \\ F(X^* + \delta X) = \min_{j=[1:m]} Z_j > 0. \end{cases}$$

Выбор метода решения задачи синтеза. Важным свойством целевых функций является их гладкость, в частности, отсутствие гребней. Сложность поиска экстремума гребневой функции заключается в

том, что при переходе через гребень градиент целевой функции резко меняет свое направление на почти противоположное, в то время как наилучшим направлением поиска является касательная к гребню. Это приводит обычно к “заклиниванию” поиска в окрестностях гребня.

Анализ физической сущности ТТ, предъявляемых к сварному соединению НЛС, на основе которых формируется функция цели, позволяет выделить ее специфические особенности и определить подходы к достижению оптимальных решений.

Помимо того, что ТТ имеют различный физический смысл, они являются противоречивыми (улучшение одного показателя, например повышение прочности, приводит к ухудшению другого — снижению пластичности). В зависимости от предъявляемых ТТ возможно даже отсутствие приемлемого проектного решения. Область поиска проектных решений определяется как прямыми ограничениями на входные параметры, так и функциональными (отсутствие ХТ, требуемый комплекс свойств). Следовательно, при выборе метода решения необходимо ориентироваться на методы условной оптимизации с ограничениями.

Учитывая конфликтность выходных параметров модели, можно сделать вывод о неизбежности возникновения гребневой ситуации в процессе поиска (в результате пересечения гиперповерхностей откликов запасов работоспособности), что позволяет рассматривать задачу оптимизации по минимаксному критерию как задачу поиска при наличии ограничений типа равенств. Для решения таких задач имеется эффективный метод поиска — метод проекции градиента. При его использовании траектория поиска проходит вдоль вершины гребня, что обеспечивает более быстрое продвижение к цели, нежели при применении градиентных методов или методов прямого поиска [4].

Алгоритм решения задачи проектирования. Наибольшей гибкостью обладают интерактивные средства проектирования, позволяющие использовать опыт специалиста при анализе промежуточных результатов и принятии решений. Алгоритм такой интерактивной процедуры, применительно к синтезу параметров технологии сварки НЛС в среде защитных газов, представлен на рис. 4.

На этапе проверки корректности исходных данных оценивается и принципиальная возможность достижения приемлемого решения. Поскольку показатели свариваемости являются структурно-зависимыми характеристиками, определяется допустимый диапазон структурных состояний НЛС, обеспечивающих выполнение ТТ к комплексу свойств ЗТВ. В случае невозможности выполнения указанных ТТ они признаются несовместными и подлежат корректировке.

Для уменьшения трудоемкости синтеза целесообразно произвести декомпозицию модели по связи “шов–зона термического влияния”

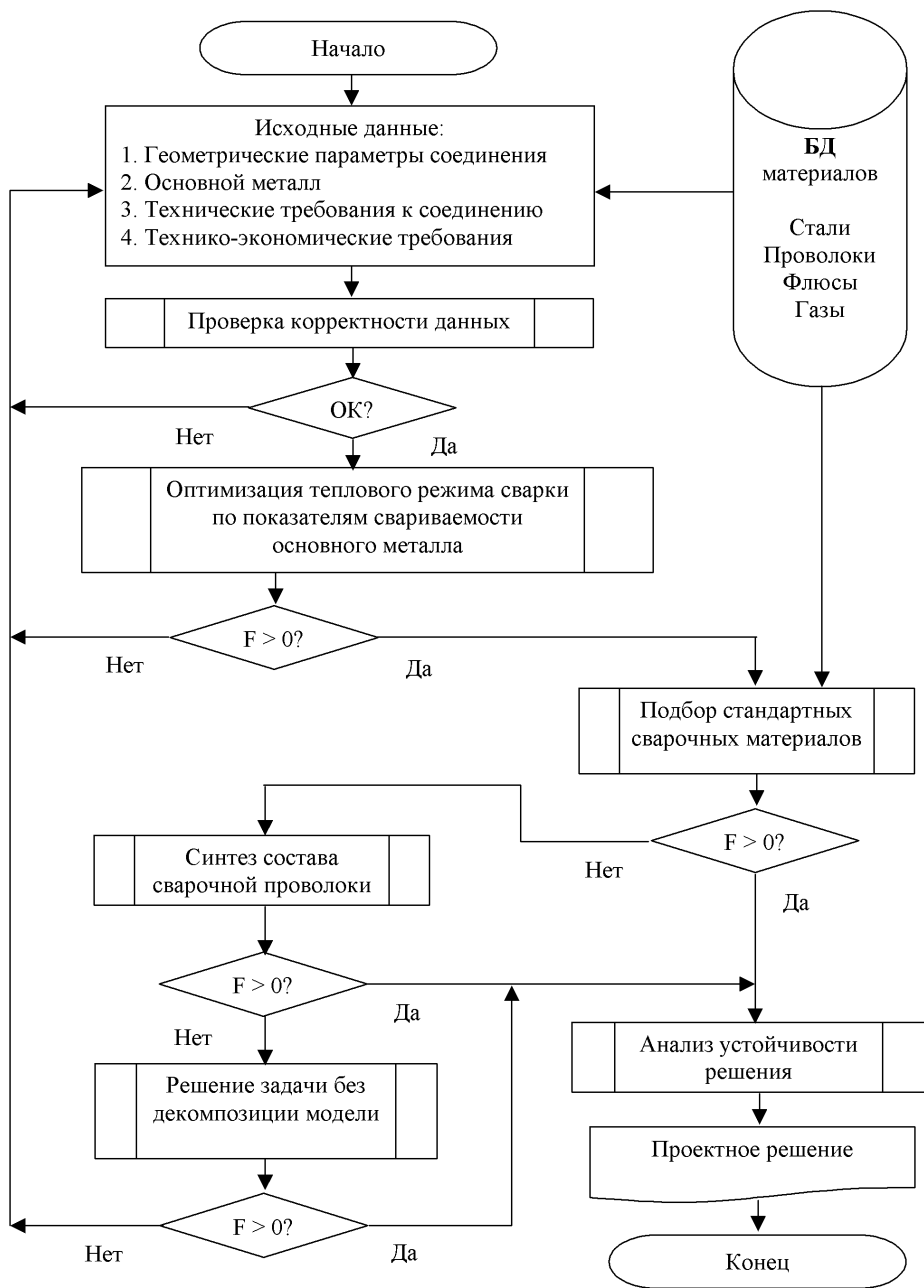


Рис. 4. Алгоритм решения задачи синтеза параметров технологии дуговой сварки НЛС в среде защитных газов

(ЗТВ) сварного соединения и решать задачу последовательно: сначала найти решение для основного металла без вариации состава металла шва (так как ТТ к основному металлу, как правило, являются более жесткими), а потом выбрать сварочную проволоку.

Оптимизация теплового режима сварки производится для обеспечения требуемого комплекса свойств ЗТВ. На этом этапе расчета опреде-

ляются температурно-временные характеристики процесса многослойной сварки (параметры режима, длины свариваемых участков, длительность перерывов и т.п.), обеспечивающие достижение требуемого структурного состояния ЗТВ и ее стойкость к образованию ХТ. Число и сечение укладываемых слоев подбираются из соображений обеспечения необходимого теплового воздействия на ранее наложенные слои. Повторный нагрев ЗТВ ранее наложенного слоя должен обеспечить перекристаллизацию и измельчение зерна аустенита, а последующие тепловые воздействия — необходимый отпуск закаленной структуры.

После выбора теплового режима предпринимается попытка подбора стандартной сварочной проволоки из базы данных, обеспечивающей при определенных ранее параметрах режима сварки получение требуемого комплекса свойств металла шва. Выбор признается удачным, если все ТТ к металлу шва (в том числе по стойкости к ХТ) выполняются, и при этом показатель сопротивляемости ЗТВ не опускается ниже заданного уровня. При отсутствии подходящей стандартной проволоки может быть рассчитан ее требуемый химический состав (ТЗ на изготовление проволоки).

Последним этапом является проверка устойчивости найденного решения при колебаниях входных параметров в пределах их естественного разброса. Решение признается устойчивым, если проверка методом наихудшего случая не выводит его за пределы области качества. В противном случае необходима корректировка решения, либо (при узости области качества) уменьшение разброса параметров (за счет выбора сварочного оборудования, стабилизации параметров режима и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
2. Макаров Э. Л., Коновалов А. В. Система компьютерного анализа свариваемости и технологии сварки конструкционных легированных сталей // Сварочное производство. – 1995. – № 3. – С. 6–9.
3. Анисимов Б. В., Белов Б. И., Норенков И. П. Машинный расчет элементов ЭВМ. – М.: Высшая школа, 1976. – 336 с.
4. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. С.А. Куркина и В.М. Ховова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 464 с.

Статья поступила в редакцию 14.09.2004

Коновалов Алексей Викторович, родился в 1960 г., окончил в 1983 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана, канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии сварки и диагностики” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Специализируется в области компьютерного моделирования физических процессов, протекающих в материалах при сварке. Имеет 33 опубликованных научных работы.

A.V. Konovalov (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Welding and Diagnostics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 33 publications in the field of computer simulation of physical processes in materials during welding.