

84217

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ГРИЦЕНКО Алексей Михайлович

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО МЕТОДА
ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СВАРКЕ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПО ЦЕЛЕВОЙ РАЗДЕЛКЕ

05.03.06 -- Технология и машины сварочного
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель - к. т. н., доцент ЯКУШИН В. Ф.

Официальные оппоненты: д. т. н., профессор Стеклов О. И.
к. т. н., доцент Чернавский Д. М.

Ведущее предприятие - НПО "ВИАМ", г. Москва

Защита состоится "13" МАЯ 1983г. на заседании специализированного Совета К. 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией
им. Н. Э. Баумана

МГТУ

Автореферат

участков
СПЕЦИАЛИЗ
К

Подписано к
Заказ 2 2 3

М 82217

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Мартенситные стали, обладая высокими служебными свойствами, являются важнейшим материалом в специальном машиностроении. Однако, по мере повышения прочности сталей закономерно снижается свариваемость, что вызывает усложнение технологии их сварки и понижает производительность сварочного производства.

Наиболее резко эта проблема проявляется при сварке тяжелых корпусных конструкций из мартенситных сталей, обладающих повышенной склонностью как к холодным (при сварке феррито-перлитным швом), так и к горячим (при сварке аустенитным швом) трещинам. Перспективным является использование аустенитно-ферритных сварочных материалов, обеспечивающих повышенную стойкость против горячих трещин в шве и холодных в ОШЗ одновременно, а также применение способа сварки по шелевой разделке, где число проходов снижается в 2-3 раза по сравнению с X-образной разделкой и, соответственно, увеличивается производительность. В этих условиях необходимо системное решение проблемы по свариваемости, производительности и стоимости сварочных работ. Традиционное экспериментальное решение этой задачи с помощью проб при сварке толстостенных конструкций из термоупрочненных сталей является весьма трудоемким, в связи с большими затратами на изготовление образцов, их сварку, разрезку и анализ.

Необходима разработка экспресс-оценок сопротивляемости горячим трещинам на базе расчетных или экспериментально-расчетных методов. Однако, на современном этапе расчетные методы оценки слабо развиты и имеют, как правило, вид статистических моделей, безотносительно к технологии сварки. Это не позволяет их использовать применительно к сварке тяжелых корпусных конструкций, когда требуется сопоставление реального темпа деформации сварного соединения с критическим, зависящих как от металлургических, так и технологических факторов. Таким образом, необходимо создание экспериментально-расчетного метода оценки технологической прочности, учитывающего одновременное влияние химического состава металла шва и режима сварки.

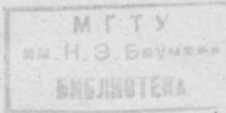
Цель работы. Обеспечение условий свариваемости мартенситных сталей путем оптимизации технологии сварки на основе разработки экспериментально-расчетного метода оценки технологической прочности.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1087217

Гриценко А.М. Разработка



Методы исследования. Сопротивляемость образованию горячих трещин определялась по количественной методике МВТУ и статистическим моделям. Влияние режима сварки на параметры сварочной ванны исследовалось с применением метода "выдувания" жидкого металла из-под дуги. Уравнение поверхности фронта кристаллизации и направление роста кристаллитов при объемной схеме кристаллизации рассчитывались из условия ортогональности осей кристаллитов к поверхности фронта кристаллизации с использованием метода Розенброка на ЭВМ СМ-4 и ПЭВМ типа IBM/PC. Содержание остаточного феррита определялось с помощью прибора Förster. Распределение легирующих элементов изучалось на сканирующем электронном микроскопе РЭМ-100У. Коэффициенты регрессионного уравнения получены с применением пакета статистической обработки данных "STATGRAPH".

Научная новизна. В результате проведенных исследований разработана методика экспериментально-расчетного определения показателя технологической прочности, предусматривающая комплексную оценку влияния химического состава и режима сварки, на основе которой:

1. Установлено, что для аустенитно-ферритных швов снижение показателя технологической прочности при возрастании тока и скорости сварки пропорционально увеличению угла срастания кристаллитов в сварном шве в условиях направленной объемной схемы кристаллизации, и определен коэффициент корреляции между показателем технологической прочности и углом срастания кристаллитов равный $5,11 \cdot 10^{-7}$ м/к*рад.

2. Разработана регрессионная модель, учитывающая влияние химсостава металла шва на сопротивляемость горячим трещинам при фиксированном режиме сварки для хромоникелевых сталей аустенитно-ферритного класса, которая имеет вид линейной зависимости показателя технологической прочности от хром-никель эквивалента ($E(\text{Cr}/\text{Ni})$), ферритного числа (FN) и содержания вредных примесей серы и фосфора (P+S).

Практическая ценность работы заключается в разработке комплекса средств для экспериментально-расчетной оценки технологической прочности, включая создание компьютерных программ и экспериментально-исследовательского оборудования с компьютерным управлением, а также рекомендаций по совершенствованию технологии сварки по целевой разделке, позволивших увеличить

производительность в 1,5 - 1,7 раза при обеспечении необходимого уровня технологической прочности.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на научно-технической конференции сварщиков г. Ленинграда в ЛДНТП в 1990 г., на конференции сварщиков СНГ, проводимой МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1993 г. и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1992 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложения. Выполнена на 208 машинописных листах, содержит 53 рисунка, 12 таблиц и 107 наименований использованных литературных источников.

Глава 1. Посвящена анализу проблем, возникающих при сварке корпусных конструкций из высокопрочных сталей. Рассмотрены применяемые технологии и способы сварки, причины и механизм образования горячих трещин в аустенитных швах, а также методы исследования технологической прочности. Показана необходимость экспериментально-расчетной оценки сопротивляемости образованию горячих трещин, которая должна учитывать в равной мере влияние химсостава и режима сварки.

Для производства крупногабаритных тяжелых корпусных конструкций применяют листовой прокат из высокопрочных термоупрочненных сталей типа 30ХМА, 30Х2НМА толщиной до 100 мм, характеризующихся как ограниченно свариваемые. Проблема сварки высокопрочных сталей состоит в обеспечении их свариваемости, а, следовательно, и надежности сварных соединений.

Комплексное легирование этих сталей углеродом, хромом, молибденом и никелем обуславливает повышенную склонность к образованию горячих и холодных трещин при сварке. Существуют два альтернативных технологических варианта сварки рассматриваемых конструкций: феррито-перлитным и аустенитным швом. При сварке по первому варианту высока опасность возникновения холодных трещин в околошовной зоне (ОШЗ). Чтобы предотвратить их необходим высокотемпературный подогрев для уменьшения процента мартенсита в структуре и содержания водорода, что неприемлемо для сложных крупногабаритных конструкций из термоупрочненных сталей и поточного производства. Второй вариант требует применения однофазных аустенитных сварочных материалов с большим

запасом аустенитности. Однако, однофазная кристаллизация вызывает повышенную склонность к образованию горячих трещин при сварке за счет выделения по границам кристаллов легкоплавких эвтектических прослоек. Чтобы снизить опасность возникновения горячих трещин существующая технология сварки предусматривает сварку на пониженных режимах, что существенно снижает производительность.

В случае многопроходной сварки больших толщин значительно повысить производительность позволяет применение технологии сварки по щелевой разделке, при которой снижается число проходов, объем механообработки, расход свариваемых материалов, а также повышается прочность за счет эффекта контактного упрочнения "мягкой" прослойки. Однако, теплофизические условия, присущие данной технологии, приводят к условиям кристаллизации, приближенным к "плоской" схеме, и, тем самым, усиливают склонность к высокотемпературным разрушениям, особенно при выполнении корневого прохода.

Для сварки по щелевой разделке термоупрочненных сталей необходимо использование сварочных материалов, обеспечивающих повышенную стойкость против горячих трещин в шве и отсутствие холодных трещин в ОШЗ. Это может быть достигнуто с помощью компромиссного варианта - применением двухфазных сталей аустенитно-ферритного класса, поиск которых и разработка технологии сварки требует комплексных методов исследования свариваемости. Существующие методы оценки технологической прочности нацелены на избирательный анализ и не предусматривают обобщенной количественной оценки.

К настоящему времени выполнено значительное число научных работ, посвященных анализу причин хрупкого разрушения в процессе кристаллизации. В работах Н. Н. Прохорова, Б. А. Мовчана, М. Х. Шоршорова, Т. А. Чернышовой, Б. И. Медовара, С. Лундина, И. Гривняка, Д. Борланда и других указаны пути повышения технологической прочности, основанные на анализе металлургического аспекта проблемы, но не учитывающие роль технологии и, в частности, режима сварки. С другой стороны, в работах Б. Ф. Якушина, Г. А. Славина, К. Вилкен, А. Желева дан анализ технологического аспекта проблемы и установлена зависимость технологической прочности от режима сварки. Применяв в качестве показателя технологической прочности критический темп деформации ($\dot{\epsilon}_{кр}$), а

в качестве критерия режима сварки - произведение мощности дуги на скорость сварки ($R=q \cdot V_{св}$), в работах Б. Ф. Якушина выявлены однотипные зависимости $B_{кр} = f(R)$, имеющие одинаковый характер для сплавов различного химсостава. Для определения текущего значения показателя технологической прочности ($B_{кр}$) необходимо знать его максимальное значение ($B_{кpo}$), которое предлагается определять по влиянию химсостава на фиксированном оптимальном режиме, и его относительное снижение (K) - при увеличении критерия режима сварки, которое учитывается за счет изменения схемы кристаллизации.

Однако, такой метод оценки технологической прочности требует большого объема экспериментов для оценки показателей свариваемости в широком диапазоне режимов и химсоставов, что особенно трудоемко при сварке тяжелых корпусных конструкций из термоупрочненных сталей.

Предполагается, что решение этой проблемы может быть достигнуто при помощи экспериментально-расчетного метода, учитывающего суммарное влияние металлургических и технологических факторов на сопротивляемость образованию горячих трещин.

В соответствии с вышеизложенным в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Выявление функциональных связей между показателем технологической прочности и параметрами схемы кристаллизации аустенитного шва.
2. Определение влияния параметров объемной схемы кристаллизации на сопротивляемость горячим трещинам при варьировании режима сварки.
3. Определение влияния критерия химсостава металла шва на сопротивляемость горячим трещинам при фиксированном режиме сварки.
4. Разработка методики определения показателя технологической прочности, учитывающего влияние режимов сварки и химсостава металла шва.
5. Совершенствование оборудования для реализации высокоэффективных методов оценки сопротивляемости образованию горячих трещин.
6. Разработка рекомендаций по повышению технологической прочности при сварке тяжелых корпусных конструкций по целевой разделке.

Глава 2. Посвящена исследованию функциональных связей между технологической прочностью металла шва и режимом сварки. Для анализа влияния параметров режима сварки на технологическую прочность были выбраны серийно применяемая сварочная проволока Св-08Х20Н9Г7Т и дополнительно - Св-07Х18Н9ТЮ и Св-08Х19Н9С2С2, которые принадлежат к одному аустенитно-ферритному структурному классу.

Сварка по щелевой разделке имеет особенности, связанные с тем, что дуга горит в узком зазоре между стенками разделки. Напряжение дуги зависит от размера зазора, а условия качественного формирования шва при сварке по щелевой разделке требуют такой комбинации тока и скорости сварки, чтобы площадь поперечного сечения шва оставалась постоянной при изменении параметров режима.

Для выбора значений силы тока и скорости сварки, которые удовлетворяют указанному условию проведены экспериментальные исследования с использованием теории планирования многофакторного эксперимента. Установлено, что качественное формирование шва обеспечивается, если площадь его поперечного сечения составляет около 100 кв. мм, что позволило получить зависимость силы тока [А] от скорости сварки [м/с] при которых сохраняется это значение:

$$I = 147,7 + 57,26 \times 10^{-3} * V_{св} \quad (1)$$

Данная зависимость в дальнейшем была использована для выбора режимов сварки по щелевой разделке при оценке технологической прочности. Сварка образцов проводилась на значениях скорости сварки от 14 до 23 м/ч ($3,89 \times 10^{-3}$ - $6,39 \times 10^{-3}$ м/с) и, соответственно, значениях тока от 290 до 380 А. Диаметр электрода - 2 мм, вылет - 40-45 мм. В качестве защитного газа применялась смесь 85% Ar + 15% CO₂, что обеспечило струйный перенос металла и эффективную защиту от окисления.

При испытаниях образцы сваривались встык и нагружались по схеме трехточечного изгиба, что позволило получать в вершине шва поперечные растягивающие деформации и приводило к образованию продольных горячих трещин, характерных для реальных конструкций. Испытывался металл шва корневого прохода, как наименее стойкий. По значениям критической скорости растяжения и средней скорости охлаждения металла шва в ТИХ вычисляли критический темп деформации $\dot{\epsilon}_{кр}$ [м/град]. Значения критического

темпа деформации установлены на различных режимах сварки для каждого исследуемого химсостава сварочной проволоки. Поскольку изменение тока и скорости сварки обеспечивает одинаковую площадь шва, химсостав наплавленного металла оставался практически неизменным. Это позволило оценивать технологическую прочность металла шва, учитывая влияние режима сварки, так как при установленных условиях остальные факторы не изменяются.

Приняв в качестве критерия режима (R) произведение эффективной мощности дуги на скорость сварки, установлены функциональные зависимости между показателем технологической прочности ($B_{кр}$) и указанным критерием для каждой марки сварочной проволоки. Они имеют одностипный вид кривых с максимумом. Наибольшая сопротивляемость горячим трещинам наблюдается для марки О7Х18Н9ТЮ, наименьшая - О8Х19Н9С2С2. Ее изменение пропорционально логарифму критерия режима R . При введении полулогарифмической системы координат функции $B_{кр}=f(\lg R)$ носят линейный характер (Рис. 1. а) и описываются уравнением:

$$B_{кр} = B_{кpo} - K \cdot \lg(R/R_o) \quad (2)$$

Указанные выше зависимости получены при кристаллизации шва по объемной схеме. Они подтверждают установленную ранее Б. Ф. Якушиным и Н. Р. Гаджиевым физическую модель для плоской схемы кристаллизации. Характер функций $B_{кр}=f(R)$ остается неизменным, так как определяется объективными процессами, происходящими в металле шва при кристаллизации. Практический интерес при оценке технологической прочности представляют высокопроизводительные режимы, расположенные правее оптимального значения R_o , соответствующего максимальному значению показателя $B_{кpo}$ (Рис. 1. а).

Превалирующее влияние на технологическую прочность оказывает схема кристаллизации, обуславливающая совокупность углов, под которыми участки кристаллитов встречаются в зоне срастания. В результате металлографического анализа установлено, что при возрастании критерия режима R угол срастания кристаллитов в центре шва постепенно увеличивается до тех пор, пока не образуется стык двух фронтов в виде переплетения вершин кристаллитов. Для определения относительного снижения показателя технологической прочности при увеличении режима был введен критерий макроструктуры, выраженный через угол срастания кристаллитов (Θ). Поиск аналитических решений показал, что предложенные

Н. Н. Прохоровым формулы для определения направления осей кристаллитов рассматривают частные случаи поверхностей (эллиптические, параболические, конические), описываемые квадратичными уравнениями. При анализе полученных экспериментальным путем форм сварочной ванны, определено, что при сварке по шелевой разделке данные решения не могут быть использованы, так как поверхность фронта кристаллизации отличается от рассмотренных случаев. Это требует решения задачи в общем виде с применением численных методов.

Для расчета пространственного угла срастания кристаллитов создана компьютерная программа, основанная на принятом ранее условии ортогональности осей кристаллитов к поверхности фронта кристаллизации, которая определяет пространственное положение ортогонали к этой поверхности (Рис. 2). Численное значение угла срастания кристаллитов (θ) зависит от координат точки А, в которой берется нормаль к поверхности фронта кристаллизации, поэтому расчет велся при постоянных значениях относительных координат т. А (K_{xo} , K_{yo} , K_{zo}), выбранных таким образом, чтобы обеспечивалось подобие ее расположения на поверхности. После проведения расчетов были получены зависимости угла срастания кристаллитов от критерия режима сварки, которые в полудогарифмической системе координат имеют линейный характер (Рис. 1. б). В форме подобной уравнению (2) можно записать:

$$\theta = \theta_0 + m \cdot \lg(R/R_0) \quad (3)$$

Путем решения системы уравнений (2) и (3) определен коэффициент корреляции между показателем технологической прочности ($B_{кр}$) и углом срастания кристаллитов (θ), равный $5,11 \cdot 10^{-7}$ м/к*рад. В итоге, учитывая влияние угла срастания кристаллитов и используя коэффициент корреляции, для сварочных материалов и условий сварки, близких к уже исследованным, относительное снижение (K) показателя технологической прочности при увеличении критерия режима сварки (R) определено расчетным путем и составляет $K=10,2 \cdot 10^{-6} \cdot [(м/к)/\lg R]$. Для оценки новых сварочных материалов и технологий сварки при использовании разработанных расчетных программ возможно значительно сократить экспериментальные исследования и ограничиться проведением испытаний для получения опорных данных и контроля достоверности расчетов.

Таким образом, установлены функциональные связи между

технологической прочностью и схемой кристаллизации от режима сварки, а также созданы расчетные программы, что позволило предложить экспериментально-расчетную модель оценки сопротивляемости горячим трещинам, которая достоверна для условий сварки, приводящих к получению швов со столбчатой макроструктурой.

Глава 3. Посвящена исследованию влияния химического состава металла шва на сопротивляемость образованию горячих трещин. Рассмотрены вопросы, связанные с расчетными и экспериментальными методами оценки технологической прочности металла шва аустенитно-ферритных сталей.

Фазовый состав высоколегированных аустенитных сталей зависит от соотношения легирующих элементов ферритизаторов (Cr, Si, Mo, Ti, Al, Nb, W, V) и аустенизаторов (Ni, C, Co, Mn, Cu, N, B), комплексное влияние которых определяет свойства металла шва. Рассматривая псевдобинарную диаграмму Fe-Cr-Ni, различные исследователи отмечают три основных способа образования первичной структуры в процессе твердения металла шва: с первичной кристаллизацией аустенитной фазы, когда остаток расплава в междендритном пространстве затвердевает как эвтектика, и с первичной кристаллизацией ферритной фазы, когда образовавшиеся дендриты в процессе охлаждения преобразуются в аустенит, а также с двухфазной кристаллизацией. Одновременное выделение двух фаз из жидкого металла приводит к получению мелкой дезориентированной структуры, когда ферритная фаза может сохраниться в ядре дендритов и после охлаждения, в результате чего вероятность образования горячих трещин уменьшается.

Недостаточность сведений о соотношении объемов жидкой и твердой фаз, температуре плавления, смачиваемости жидкостью твердой фазы, эффективных коэффициентах распределения элементов в неравновесных условиях сварки не позволяет разработать обобщенную физическую модель, связывающую сопротивляемость образованию горячих трещин и химический состав металла шва. Поэтому, во всех известных работах такие зависимости строятся на основе статистических моделей и регрессионного анализа.

Для оценки влияния химсостава в настоящее время известно около десяти различных расчетных показателей образования горячих трещин. Предварительная проверка возможности использования этих уравнений показала значительный разброс результатов рас-

чета и экспериментальных данных, что, вероятно, объясняется различием в режимах сварки при проведении исследований, допустимые отклонения которых не приводятся. Это вызвало необходимость получения новой регрессионной модели для оценки составляющей Вкпо показателя технологической прочности, которая отражает влияние химсостава.

При построении расчетной модели, за ее основу была принята линейная зависимость показателя технологической прочности от хром-никель эквивалента ($E(Cr/Ni)$), ферритного числа (FN) и содержания вредных примесей серы и фосфора (P+S). После статистической обработки экспериментальных данных было получено уравнение, все коэффициенты которого являются значимыми:

$$Вкпо = (-3,773 + 2,331 * E(Cr/Ni) + 0,4951 * FN - 47,33 * (P+S)) * 10^{-7} \quad (4)$$

Применение полученной модели для оценки сопротивляемости горячим трещинам значительно сократит число экспериментальных исследований при определении показателя технологической прочности в зависимости от химсостава металла шва. С другой стороны, известно, что статистические методы обработки данных направлены на построение моделей, которые носят вероятностный характер и не могут полностью заменить, но весьма эффективно дополняют экспериментальные исследования. В этом случае необходимо проведение экономного (по времени и затратам) эксперимента, подтверждающего или корректирующего модель. При оценке сопротивляемости горячим трещинам этим требованиям отвечают испытания образцов с имитацией термдеформационного сварочного цикла. Необходимо отметить, что закристаллизованный и прокатанный металл имеют различную зависимость пластичности от температуры, поэтому образцы для испытаний вырезались из сваренных по шелевой разделке пластин, что обеспечивало в испытуемом сечении закристаллизованный металл шва.

Оценка технологической прочности проводилась на машине для исследования свариваемости МИС-1, позволяющей нагревать по заданной программе испытуемый образец с его одновременным деформированием. Установленные в имитационное приспособление образцы нагревались по закону, соответствующему реальному термическому циклу, который был получен при сварке образцов со шелевой разделкой. Плавно увеличивая от опыта к опыту скорость растяжения образцов определяли величину критического темпа деформации Вкрим металла в ТИХ, при котором происходит хрупкое

межкристаллическое разрушение образца.

Сравнивая результаты испытаний при имитации сварочного цикла для сплавов 08Х20Н9Г7Т, 07Х18Н9ТЮ и 08Х19Н9ТЮ2, а также результаты, полученные при сварке этими же проволоками, установлена корреляционная связь между показателями Вкро и Вкрим. В этом случае регрессионное уравнение (4) с учетом значения коэффициента корреляции $K_{им} = 0,169$ для случая испытаний с имитацией сварочного цикла можно записать в следующем виде:

$$Вкрим = (-2,236 + 1,379 \times E(Cr/Ni) + 0,2936 \times FN - 28,01 \times (P+S)) \times 10^{-6} \quad (5)$$

Если при оценке технологической прочности новых материалов экспериментальные данные, полученные при испытаниях с имитацией сварочного цикла, имеют хорошую сходимость с результатами расчета по формуле (5), то влияние химического состава металла шва на показатель технологической прочности Вкро определяется по уравнению (4) без корректировки регрессионной модели.

Таким образом, установление корреляционных связей между Вкро и Вкрим, дало возможность оценивать влияние химсостава металла шва на технологическую прочность по экспериментально-расчетной методике с проведением экономных экспериментальных исследований при использовании регрессионных моделей, которые достоверны для Fe-Cr-Ni сплавов, имеющих аустенитно-ферритную структуру, применение которых при дуговой сварке мартенситных сталей по шелевой разделке является предпочтительным.

Глава 4. Посвящена разработке основных положений по применению экспериментально-расчетного метода оценки технологической прочности, а также вопросам создания нового исследовательского оборудования для реализации этого метода.

Для прогнозирования стойкости сварных соединений против образования горячих трещин необходимо количественно оценить уровень технологической прочности в зависимости от химсостава металла шва и режима сварки. На основе проведенной работы был создан алгоритм определения показателя технологической прочности. Общая схема действий по разработанной экспериментально-расчетной методике предусматривает действия по следующим двум основным направлениям - первое: определение максимального значения показателя технологической прочности (Вкро) в зависимости от химсостава для различных сварочных материалов на оп-

тимальном режиме сварки, и второе: определение относительного снижения этого показателя в зависимости от критерия режима (R) при переходе на более произвольные режимы.

По первому направлению проводятся исследования технологической прочности при сварке или имитации сварочного цикла для материалов различного химсостава экспериментальными и расчетными методами с использованием полученного регрессионного уравнения. Второе направление предусматривает оптимизацию режима сварки по критерию макроструктуры шва. При этом производится расчет параметров уравнения фронта кристаллизации и пространственного угла срастания кристаллитов для случая объемной схемы и определяется степень снижения (K) показателя ($R_{кр}$) при увеличении критерия режима (R). После учета влияния химсостава и режима сварки критический темп деформации рассчитывается по уравнению (2). Последовательность действий по данному алгоритму различается в зависимости от накопленного банка данных по способам сварки, используемым сварочным материалам и типам соединений. Оценка сопротивляемости горячим трещинам при помощи экспериментально-расчетного метода подтверждена данными испытаний натуральных образцов.

Апробация предложенного метода была проведена при оценке технологической прочности нового сварочного материала 04X22HBM3TЮ, разработанного во ВНИИСтали, вместо применяемого в настоящее время 08X20H9Г7Т. Рекомендации по повышению технологической прочности и оптимизации технологии сварки основывались на сопоставлении критического темпа деформации, определенного для исследуемого материала, и темпа деформации реального натурального образца^{*)} с использованием вероятностного подхода (Рис. 3). Проведенные исследования показали, что применение для сварки по шелевой разделке проволоки 04X22HBM3TЮ, имеющей повышенную сопротивляемость горячим трещинам, дало возможность повысить значение критерия режима до $R_{кр}=0,059 \text{ кДж/м/с}^2$ (что соответствует $I=360 \text{ А}$ и $V_{св}=5,83 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}=21 \text{ м/ч}$) по сравнению с 08X20H9Г7Т, у которой $R_{кр}=0,033 \text{ кДж/м/с}^2$ ($I=300 \text{ А}$ и $V_{св}=4,17 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}=15 \text{ м/ч}$), без снижения уровня технологической прочности.

Для экспериментальной оценки технологической прочности была разработана и создана при участии диссертанта машина для

^{*)} Данные Шефеля В. В.

исследования свариваемости МИС-1, имеющая аналоговое и компьютерное управление. Принцип действия МИС-1 основан на моделировании металлургических и теплофизических процессов сварки для металла шва и зоны термического влияния по ГОСТ 26388-84 и ГОСТ 26389-84 и позволяет проводить оценку сопротивляемости горячим и холодным трещинам металла шва и околошовной зоны, а также механические свойства в интервале температур от 20 град. до T_{плавл.} Применение ПЭВМ типа IBM/PC, связанного через ЦАП-АЦП преобразователи с исполнительным блоком машины, и специально разработанных управляющих и расчетных компьютерных программ обеспечивает моделирование термического и деформационного цикла по различным законам, а также возможность автоматизированной обработки результатов и создания банка данных. По своим техническим возможностям МИС-1 не уступает, а по некоторым, и превосходит зарубежные аналоги.

Таким образом, обеспечение свариваемости мартенситных сталей на высокопроизводительных режимах достигается путем оптимизации технологии сварки и применения аустенитно-ферритных сварочных материалов, которые рекомендованы в результате исследований, проведенных с помощью разработанного экспериментально-расчетного метода оценки технологической прочности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. При многопроходной сварке крупногабаритных конструкций из высокопрочных сталей по щелевой разделке аустенитно-ферритными швами установлено, что, по сравнению с X-образной разделкой наряду с повышением в 2-3 раза производительности, возрастает дефектность формирования швов и склонность к образованию горячих трещин, особенно в корневом проходе. Для оптимизации технологии сварки необходима комплексная методика, предусматривающая оценку сопротивляемости горячим трещинам с учетом влияния металлургических и технологических факторов.

2. Установлено, что дефектность формирования швов, обусловленная теплофизическими условиями сварки по щелевой разделке шириной 8-10 мм, предотвращается, если площадь поперечного сечения шва составляет около 100 кв. мм, а ток и скорость сварки являются при этом зависимыми величинами.

3. При сварке толстолистового металла по щелевой разделке установлено, что зависимость показателя технологической проч-

ности $V_{кр}$ от критерия режима сварки $R=q \cdot V_{св}$ при неизменном химическом составе металла шва, имеет вид кривой с максимумом, а снижение показателя $V_{кр}$ на производственных режимах функционально связано с увеличением угла срастания кристаллитов, отражающего изменение схемы кристаллизации.

4. Создана компьютерная программа, позволяющая описать поверхность фронта кристаллизации и рассчитать угол срастания кристаллитов, как угол между ортогоналами к этой поверхности, в условиях объемной схемы кристаллизации аустенитно-ферритных сталей, и на ее основе определено относительное снижение ($K=10,2 \cdot 10^{-6}$) показателя технологической прочности $V_{кр}$ при увеличении критерия режима сварки R .

5. Установлена корреляционная связь между показателями технологической прочности при сварке образцов и при имитации сварочного цикла, что объясняется идентичностью природы образования горячих трещин по ликвационным межкристаллитным прослойкам в сравниваемых способах.

6. Для учета влияния химического состава аустенитно-ферритных сплавов с содержанием ферритной фазы до 15-20%, разработана регрессионная модель определения показателя технологической прочности $V_{кpo}$ на фиксированном режиме, включающая в качестве параметров хром-никель эквивалент $E(Cr/Ni)$, ферритное число FN и суммарное содержание вредных примесей серы и фосфора ($P+S$).

7. На основе полученных закономерностей разработана экспериментально-расчетная методика, предусматривающая комплексный подход и количественную оценку сопротивляемости горячим трещинам с учетом влияния металлургических и технологических факторов.

8. Разработаны рекомендации по экспериментально-расчетному выбору двухфазных аустенитно-ферритных сварочных материалов и технологии, обеспечивающих отсутствие горячих трещин в толстолистовых конструкциях при сварке по шелевой разделке, основанные на сравнении полученных зависимостей критического темпа деформации от режима сварки и темпа деформации жесткой пробы, адекватной реальной сварной конструкции.

9. При участии диссертанта создана и передана в НПО "ВИИМ" испытательная машина для исследования свариваемости МИС-1, имеющая аналоговое и компьютерное управление, что позволяет

проводить экспериментальную оценку сопротивляемости образованию трещин различной природы, в том числе при имитации сварочного цикла, расчетную обработку результатов, а также создавать базы данных, реализуемые на ПЭВМ.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Якушин В. Ф., Гриценко А. М., Гаджиев Н. Г. Расчетно-экспериментальный метод определения сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин // Сварочное производство. - 1991. - N 4. - С. 29-32.

2. А. с. 1609589 СССР, МКИ В23К 28/00. Способ оценки сопротивляемости образованию горячих трещин и устройство для его осуществления / В. Ф. Якушин, А. М. Гриценко, Л. Ф. Буданенков // Б. И. - 1991. - N 2. - С. 23.

3. Якушин В. Ф., Гриценко А. М. Испытательная машина исследования свариваемости // Автоматизация в сварочном производстве: Материалы научно-технической конференции сварщиков Урала и Казахстана. - Ижевск, 1989. - Ч. 1 - С. 57-58.

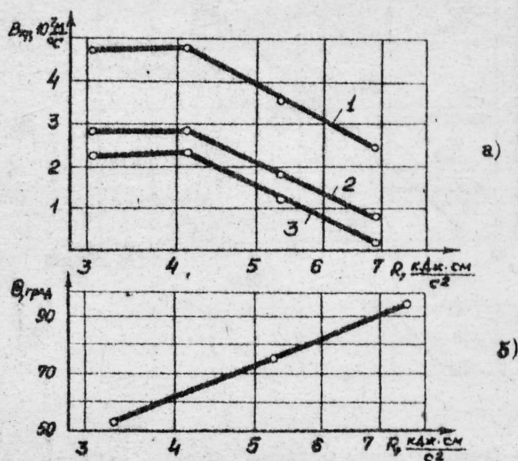


Рис. 1. Зависимость K_{IC} (а) и G_c (б) от R в полулогарифмической системе координат: 1-07X18H9TЮ; 2-08X20H9T7T; 3-08X19H9TЭС2

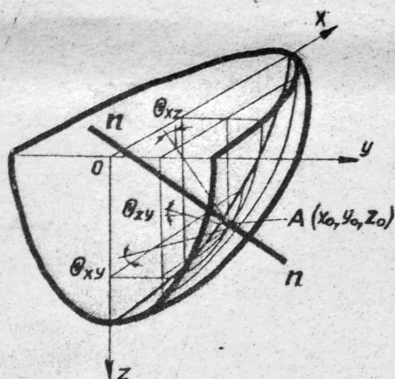


Рис. 2. Схема определения направления роста оси кристаллита ($n-n$) из произвольной точки $A(x_0, y_0, z_0)$

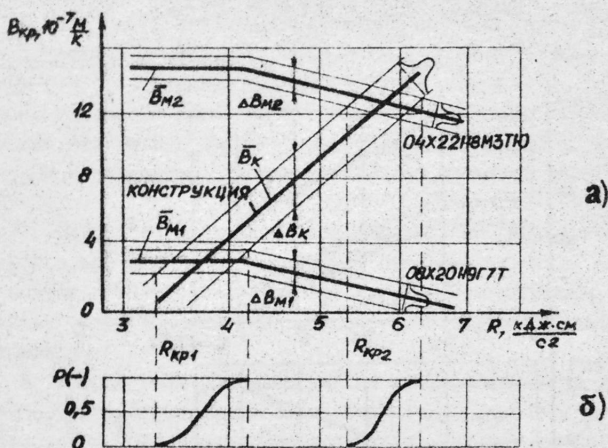


Рис. 3. Влияние режима сварки и химсостава на величину запаса технологической прочности (а) и вероятность образования горячих трещин (б): R_{kp1} и R_{kp2} - критические режимы сварки для сплавов 08X20H9ГТТ и 04X22H8М3ТЮ, соответственно