

М249440

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

ЧЕРНАВСКИЙ Дмитрий Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ
НА ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН
В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

(Специальность 05.04.05 — «Технология и машины
сварочного производства»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доцент, кандидат технических наук Б. Ф. Якушин.

Официальные оппоненты —
профессор, доктор технических наук В. М. Сагалевиц,
ст. научный сотрудник,
кандидат технических наук С. Н. Киселев.

Ведущее предприятие — ук
вета.

Автореферат разослан «

Защита диссертации состо
на заседании Совета Москов
Трудового Красного Знамени
им. Н. Э. Баумана по адресу:
улица, дом 5.

Ваши отзывы на реферат
печатью, просим высылать п

С диссертацией можно оз
им. Н. Э. Баумана.

Ученый секретарь Совета

M249470

Согласно директив XXIV съезда КПСС одной из задач пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг является повышение производительности сварочных процессов при одновременном резком повышении качества и надежности сварных изделий. Качество и надежность сварных соединений зависит от эксплуатационной прочности металла и его сопротивляемости образованию холодных и особенно горячих трещин, которые наблюдаются при сварке любых сплавов. Их возникновение обусловлено неизбежным совмещением при сварке процессов кристаллизации металла шва и его деформирования. Проблема борьбы с горячими трещинами привлекает внимание крупнейших научных школ в СССР и за рубежом и получает особое значение в настоящее время, в пору широкого внедрения в промышленности высокопрочных материалов. Опыт их использования в сварных конструкциях показывает, что с увеличением эксплуатационной прочности металлов, как правило, резко увеличивается вероятность образования горячих и холодных трещин. Существенный вклад в решение проблемы, борьбы с горячими трещинами, сделан в работах Бочвара А.А., Прохорова Н.Н., Мовчан Б.А., Новикова И.И., Шоршорова М.Х., Ерохина А.А., Рабкина Д.М., Рунова А.Е. и др. В этих работах главное внимание уделено анализу металлургического аспекта проблемы, итогом которого явились рекомендации по выбору оптимального состава сплавов. Однако их использование не привело к полному решению этой проблемы, так как на практике наблюдается появление горячих трещин и при сварке качественными сварочными материалами. Это можно объяснить тем, что сплавы оптимального состава могут давать качественные соединения лишь в определенном диапазоне режимов сварки. Иными словами, режим сварки является одним из главнейших факторов, определяющих условия прочности сварного шва при кристаллизации. Доказательством этому служат факты о том, что ряд сплавов, характеризующихся хорошей свариваемостью на одних режимах (например, сплав АМг6), оказывается непригодным для сварки на других режимах. Важно подчеркнуть, что резкое снижение технологической прочности имеет место на режимах, отличающихся, как правило, большой производительностью. Однако причины снижения технологической прочности при сварке на форсированных режимах не выявлены. Так, нет данных о влиянии режима сварки на темп деформации металла шва в процессе его кристаллизации (т.е. интенсивности нарастания деформации по мере снижения температуры), на температурный интервал образования горячих трещин, на пластичность металла шва в этом интервале. Более того, отсутствует методика, позволяющая определить количественно влияние режима сварки на вероятность образования горячих трещин.



М249470

Для дальнейшего развития теории технологической прочности необходимо проанализировать ее зависимость от режима сварки. Эти исследования имеют и большую практическую значимость, т.к. позволяют перейти к научно-обоснованному выбору режима сварки, обеспечивая высокий уровень технологической прочности, надежности сварных соединений, а также повышение производительности работ при их изготовлении.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование влияния режима сварки на технологическую прочность металла шва при кристаллизации и разработка методики для количественного анализа этой зависимости.

В связи с этим, задачами настоящей работы явились:

1. Исследование влияния режима сварки на термомеханический цикл металла шва в условиях изменения жесткости заготовок и теплофизических свойств сплавов.

2. Исследование влияния режима сварки на величину ТИХ (температурный интервал хрупкости) и пластичность металла шва в этом интервале.

3. Разработка методики оценки сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин в условиях изменения режима сварки.

4. Исследование влияния режима сварки на образование горячих трещин в алюминиевых сплавах.

5. Оценка запаса технологической прочности при сварке некоторых типовых сварных конструкций.

В качестве материала для исследования служили в основном алюминиевые (промышленные, опытные и модельные) сплавы, как наиболее целесообразный в методическом отношении и перспективный конструкционный материал, широкому применению которого в сварных конструкциях препятствует высокая склонность к образованию горячих трещин, особенно для сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ СВАРКИ.

Для анализа технологической прочности в условиях изменения режима сварки необходимы сведения о величине деформаций в температурном интервале образования горячих трещин, претерпеваемых металлом шва при различных технологических условиях сварки. Поскольку в сварных швах алюминиевых сплавов возникают главным образом продольные горячие трещины, в настоящей работе ставилась задача определения величины поперечной деформации в зоне образования трещин, т.е. в центре шва.

Имеющиеся литературные данные о сварочном термомеханическом цикле получены на базах больше ширины шва и не учитывают

термическую и структурную концентрацию деформаций, вызванную наличием жидкой прослойки на стыке кристаллитов по оси шва, в связи с чем не могут дать полного ответа на поставленные вопросы.

Вышеизложенное обусловило необходимость экспериментального исследования высокотемпературных деформаций в металле шва при затвердевании. При разработке методики опробованы известные контактные способы измерения высокотемпературных деформаций и показана их непригодность при сварке на форсированных режимах и при измерении деформаций на малых базах.

Для исследования термодформационного цикла нами был разработан бесконтактный способ измерения деформаций с помощью киносъемки*, позволяющий определить деформации в районе кристаллизующегося участка шва на базе, значительно меньшей ширины шва и ориентированной по различным направлениям. Он заключается в нанесении отметок баз на кристаллизующуюся поверхность металла шва и фиксировании расстояний между ними с помощью киносъемки в процессе сварки.

Отметки баз в шве получали путем напыления на поверхность сварочной ванны мелкодисперсных частиц железного порошка, обладающего пониженной смачиваемостью расплавленным металлом ванны. Они дают достаточно контрастные хорошо заметные отметки баз. Минимальная база измерений равнялась 2-3 мм, а максимальная - 12-15 мм; отметки больших баз располагали за пределами шва, в связи с чем их наносили вблизи линии сплавления перед сваркой в виде перекрестий, рисок или вдавливанием металлических частиц, резко отличающихся по отражательной способности света.

Для измерения деформаций в кристаллизующемся металле шва использовали специальные сварочные горелки, имеющие малую высоту и прозрачную верхнюю крышку. Небольшая высота сварочной горелки позволяла производить киносъемку сварочной ванны при газозлектрической сварке с минимального расстояния и с большой точностью за счет вертикального расположения оптической оси кинокамеры относительно поверхности металла сварочной ванны. После проявления пленки расстояния между отметками каждой базы измеряли с помощью инструментального микроскопа при увеличении в 12-44 раз. Общее увеличение при обработке результатов исследований было 20-75 кратным. Эксперименты показали достаточную точность измерений, при которых фиксируются перемещения более 0,01 мм. При этом погрешность составляла не более $\pm 0,1\%$ на базе 2 мм.

* Авторское свидетельство №371425 с приоритетом от 8.X.1971 г. на имя Чернавского Д.М. и др.

В исследованиях использовали листовые образцы толщиной 3 мм из промышленных и модельных сплавов алюминия (АМц, АМгЗ, АМг6 и

А1-5%Си), свариваемые прямолинейным и круговым швом неплавящимся вольфрамовым электродом без присадки со скоростью 6, 12, 24, 36 и 48 м/час. При этом мощность дуги возрастала так, чтобы обеспечить полный провар на любой из указанных скоростей сварки и плоскую схему кристаллизации. Запись термических циклов производилась на осциллографе Н-700 путем погружения спая хромель-алюмелевой термопары в охлаждающийся металл сварочной ванны. Для совмещения по шкале времени термического и деформационного цикла отмечали момент прохождения вершины изотермы через исследуемое сечение шва. Температуру металла в центре шва на вершине изотермы кристаллизации приравнивали, согласно литературных данных, верхней границе температурного интервала хрупкости. Границы ТИХ определяли для каждого сплава и режима сварки по описанной ниже методике.

Величину и знак внутренней деформации определяли дифференциальным методом. Для этого определяли деформации формоизменения, измеренные на образцах в условиях сварки, т.е. при наличии взаимноуравновешенного поля внутренних напряжений и деформаций. Их значения сравнивали с величиной свободной (дилатометрической) деформации, определяемой при свободном температурном сокращении в условиях безградиентного теплового поля и отсутствия напряжений. Величина свободной деформации для каждого состава была взята из работы И.И.Новикова. Это позволило впервые экспериментально определить распределение деформации по поперечному сечению шва и подсчитать коэффициенты концентрации на различных режимах, а также установить связь между величиной деформации в ТИХ и схемой кристаллизации.

При измерениях поперечных деформаций формоизменения при сварке встык закрепленных пластин любой толщины и жесткости наблюдали, как правило, один характер изменения размеров баз—сокращение расстояния между отметками баз в ТИХ, т.е. непосредственно после прохождения дуги через исследуемое сечение шва. Увеличение расстояния между отметками баз отмечено лишь при сварке незакрепленных узких пластин, а также в случае несплавления кромок или образования продольных трещин.

Деформации формоизменения отрицательного знака, проявляющиеся в сближении отметок баз, могут возникать из-за сжатия шва свариваемыми пластинами, которые закреплены по внешнему контуру кондуктором, а их внутренние зоны в результате нагрева дугой увеличиваются. Второй фактор, действующий в том же направлении—поперечная усадка ранее сваренных участков шва. Ее действие исключается при неспла-

лении кромок или при образовании сквозной продольной трещины.

В результате проведения различных экспериментов (при нормальном формировании шва, при несплавлении свариваемых кромок, при образовании сквозной горячей трещины) и сравнения их результатов сделан вывод, что основной причиной сокращения баз в затвердевающем металле шва является усадка ранее заваренной части шва. Деформации формоизменения, приводящие к сближению отметок баз, имеют положительное значение для снижения внутренней деформации металла шва, т.к. они способствуют его усадке. Но несмотря на сближение баз в кристаллизующейся части шва, металл испытывает растяжение, так как деформация формоизменения значительно меньше свободной деформации. Эта зависимость наблюдается при сопоставлении свободной деформации и формоизменения, измеренной как на больших, так и на малых базах. Увеличение жесткости закрепленных заготовок снижает интенсивность сближения баз и, следовательно, повышает внутреннюю деформацию металла шва в ТИХ, увеличивая, при прочих равных условиях, вероятность образования горячих трещин.

Аналогичные результаты получены при измерении деформаций в пробах с круговыми швами, воспроизводящих условия варки жестких фланцев, патрубков и вварышей в элементы типа перегородок и обечайек. Особо отмечено увеличение внутренней деформации металла при уменьшении диаметра кругового шва, а также в начале сварки и конце (кратере). Это связано с неодновременностью сварки всего периметра шва и взаимодействием диаметрально расположенных участков шва.

Наибольшие внутренние деформации в металле шва образуются в случае сварки узких незакрепленных пластин, поперечные деформации которых создаются главным образом за счет изгиба пластин. Увеличение жесткости в этом случае является положительным, т.к. уменьшается деформация изгиба и, следовательно, внутренняя деформация металла шва.

Помимо жесткости, существенное влияние на деформации металла в ТИХ оказывает скорость сварки. Получено, что при сварке с малой скоростью (6 м/час), когда кристаллиты срастаются под малым углом, все участки шва претерпевают значительную внутреннюю деформацию, распределенную по сечению шва, т.е. деформации в центре шва и на его периферии близки (рис. 1, а). При сварке с этой скоростью темп внутренней деформации в центре шва достигает максимальных значений (рис. 2, а). При сварке со скоростью 12-24 м/час, когда в центре образуется стык "осевых" и боковых кристаллитов, срастающихся под малым углом, усиливается неравномерность распределения внутренней деформации по сечению шва за счет ее концентрации на стыке срастания "осевых" и боковых кристаллитов (рис. 1, б). При увеличении скорости сварки до

36-48 м/час, когда боковые кристаллиты срастаются навстречу друг другу под большим углом, деформация концентрируется лишь в центре шва (рис. I, в), что приводит к 3-4-х кратному повышению темпа внутренней деформации в центре шва по отношению к средним значениям на базе шва. Проведенные исследования впервые позволили установить, что при использовании высокопроизводительных режимов сварки, отличающихся большой скоростью, резко возрастает концентрация деформации в центре шва. Это является одной из причин повышенной склонности шва к образованию горячих трещин при сварке на больших скоростях.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ ХРУПКОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛА ШВА В ЭТОМ ИНТЕРВАЛЕ.

В ряде работ, посвященных анализу влияния режима сварки на строение шва, сделано предположение, что при сварке на повышенных скоростях, кроме темпа деформации, может существенно изменяться пластичность металла шва и ТИХ из-за изменения размеров и взаимной ориентации кристаллитов шва и из-за увеличения концентрации легкоплавких элементов в зоне их срастания. Для подтверждения этого нами были проведены испытания сварных швов по нозым методикам, разработанным в МВТУ им. Баумана, которые позволяют определить величину температурного интервала хрупкости и минимальной пластичности в ТИХ непосредственно в процессе сварки. Сварка велась на скоростях 6-36 м/час, существенно отличающихся углом срастания кристаллитов в условиях плоской схемы кристаллизации.

По первой методике (ЛТП-I) металл шва в процессе затвердевания при сварке принудительно деформируется поперек шва с большой скоростью (2-3 мм/сек) на определенную, строго заданную величину деформации (0,01-0,25 мм). Увеличивая ее, достигают критических значений, приводящих к разрушению металла шва в ТИХ. По критическому значению деформации оценивали пластичность металла шва. Одновременно в этом эксперименте определяли и границы ТИХ путем экспериментального измерения температуры у концов трещины в момент деформирования. Резкое возрастание деформационной способности участков шва за пределами ТИХ обеспечивало воспроизводимость длин получаемых трещин, концы которых были закруглены и имели следы пластической деформации.

По другой методике (ЛТП-3) образцы, вырезанные из сварного соединения, нагревали по термическому циклу, аналогичному сварочному, и деформировали до разрушения на этапе нагрева при различных температурах. Это позволило получить сведения о прочности металла шва в ТИХ и уточнить его границы.

Установлено, что влияние режима сварки на границы температурного интервала хрупкости для сплавов различного состава описывается

двумя зависимостями. На примере модельного сплава $Al-0,5\%Si$, представляющего собой однофазный твердый раствор, показано, что при малых скоростях сварки нижняя граница (Нг) ТИХ значительно ниже солидуса, а разрушение проходит по границам зерен, пересекающим зоны срастания кристаллитов. Увеличение скорости сварки резко повышает температуру Нг ТИХ (рис. 2, б). Видимо, с увеличением скорости сварки и скорости охлаждения металла шва диффузионные процессы протекают неполностью, что затрудняет формирование линейных границ и снижает величину межзеренного скольжения. Для модельных сплавов алюминия с 5 и 8% меди, относящихся к сплавам с неравновесной и равновесной эвтектикой, и промышленного сплава М-40 получено, что значение Нг ТИХ повышается, хотя и незначительно с увеличением скорости сварки и находится на $20-25^{\circ}C$ ниже равновесного солидуса, а разрушение проходит по зонам срастания кристаллитов, обогащенных легкоплавкой фазой. Следовательно, содержание легирующих элементов в зоне срастания кристаллитов, образованной встречным движением фронтов кристаллизации, практически не изменяется на всех режимах сварки, использованных в работе.

Итак, на положение нижней границы ТИХ скорость сварки влияет лишь для однофазных сплавов; для сплавов с равновесной и неравновесной эвтектикой нижняя граница ТИХ практически не зависит от режима сварки, а, следовательно, и схемы кристаллизации.

При анализе пластичности металла шва в ТИХ получено, что для модельных сплавов алюминия с 5 и 8% меди, и промышленных сплавов $AMg3$, $AMg6$, М-40 увеличение скорости сварки снижает пластичность металла шва в поперечном направлении (рис. 2, в). Это объясняется тем, что для таких сплавов при увеличении скорости сварки изменение схемы кристаллизации приводит к значительному уменьшению количества стыков элементов макроструктуры, участвующих в межзеренном деформировании в твердо-жидком состоянии, и к резкому возрастанию концентрации деформации в этих зонах. Для низколегированных сплавов, например, модельного сплава $Al-0,5\%Si$, наоборот, увеличение скорости сварки не понижает пластичности металла шва в ТИХ, т.к. наряду с неблагоприятной ориентацией кристаллитов при сварке с большой скоростью подавляются диффузионные процессы, формирующие границы зерен, которые в этих сплавах являются зародышами горячих трещин.

Итак, для большинства промышленных сплавов увеличение скорости сварки резко снижает пластичность металла шва в ТИХ, чем и объясняется повышение их склонности к образованию горячих трещин кристаллизационного типа. Для сплавов, склонных к подсолидным разрушениям, имеют место иные зависимости.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ МЕТАЛЛА ШВА К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН.

По отдельным определенным выше параметрам технологической прочности: пластичности, ТИХ и темпу деформации металла шва нельзя выбрать режим сварки, обеспечивающий максимальную стойкость металла шва к образованию горячих трещин из-за неоднозначности их влияния. Необходимо интегральный показатель, суммирующий вклад каждого фактора.

Используя распространенные технологические пробы ("рыбий скелет", крестовая проба и др.), не удастся оценить влияние режима и способа сварки на технологическую прочность металла шва, поскольку появление трещин при сварке зависит не только от деформационной способности металла шва, но и от деформации формоизменения образца пробы. В пробах этого типа, отличающихся малой жесткостью, величина деформации формоизменения существенно зависит от режима сварки, но определение ее не предусмотрено и затруднено.

Известный показатель — критическая скорость принудительной деформации "А" (мм/мин), получаемый при машинных методах испытаний, также не пригоден для сравнения технологической прочности швов, сваренных на неодинаковых режимах из-за различного времени пребывания металла шва в ТИХ и разной величины деформации формоизменения образца, закрепленного в захватах машины. Проверка показала, что при увеличении скорости сварки "А" возрастает для большинства алюминиевых сплавов, т.е. получаются сведения, противоречащие данным практики и результатам, полученным с помощью технологических проб.

Исходя из теории технологической прочности сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин определяется величиной допустимой относительной деформации металла шва в ТИХ. Для ее определения необходимо знать период нахождения металла шва в ТИХ и замерить в зоне образования горячей трещины критическую величину относительной деформации. Это можно сделать по вышеизложенной методике измерения деформаций на образцах, претерпевающих принудительное деформирование в испытательной машине. Но измерение относительной деформации на малой базе и определение моментов начала и прекращения деформирования весьма трудоемко. Первое затруднение можно устранить за счет перехода от определения относительной деформации в зоне образования горячих трещин к интегральной величине — перемещениям свариваемых кромок образца. Этот переход правомерен, т.к. относительная деформация в локальных зонах образования горячих трещин не учитывает распределения деформации по сечению шва и, следовательно, дает менее точные сведения о сопротивляемости горячим трещинам шва в целом. Например, если допустимая внутренняя деформация в центре швов,

сваренных на различных режимах (рис. I, б и I, в) одинакова, то сопротивляемость горячим трещинам этих швов различна. Это связано с тем, что швы, в которых деформация распределяется по сечению шва, способны воспринимать без разрушения большую величину перемещения свариваемых кромок образца, чем швы с концентрацией деформации в узкой зоне. Поэтому при оценке сопротивляемости металла шва образованию продольных горячих трещин важнее определить критическую величину перемещения свариваемых кромок образца, а не относительную деформацию в зоне образования горячих трещин. Дальнейшее упрощение методики заключается в переходе от определения критической величины перемещения свариваемых кромок образца в ТИХ к пропорциональной величине — критическому темпу перемещения свариваемых кромок образца $\alpha_{кр} = \Delta_{кр} / \Delta T$ (I), т.е. отношению критической величины перемещения свариваемых кромок к перепаду температур за период высокотемпературной деформации металла шва. Вследствие, установленной выше, монотонности накопления деформации при высоких температурах темп практически постоянен как в ТИХ, так и в более широком интервале. Этот переход позволяет исключить дополнительные эксперименты по определению границ ТИХ. Полученный показатель $\alpha_{кр}$ в скрытой форме учитывает как величину допустимой деформации, так и равномерность ее распределения по поперечному сечению шва. При практическом определении этого показателя следует учесть, что $\Delta_{кр} = V_{кр} \cdot t_{тих}$ и $\Delta T = \omega \cdot t_{тих}$. Это позволяет преобразовать формулу (I) в следующем виде:

$$\alpha_{кр} = \frac{\Delta_{кр}}{\Delta T} = \frac{V_{кр} \cdot t_{тих}}{\omega \cdot t_{тих}} = \frac{V_{кр}}{\omega},$$

где $\alpha_{кр}$ — критический темп перемещения свариваемых кромок образца, превышение которого приводит к образованию горячей трещины, (мм/°C);

ω — скорость охлаждения металла шва в интервале кристаллизации, (°C/мин);

$V_{кр}$ — критическая скорость перемещения свариваемых кромок, приводящая к возникновению горячей трещины, (мм/мин); ее величина пропорциональна скорости перемещения захватов машины при сварке на постоянных режимах.

При изменении режима сварки скорость перемещения захватов машины, обычно обозначаемая индексом "А" не пропорциональна средним перемещениям свариваемых кромок образца от машинной деформации из-за теплового их расширения. Причем величина создаваемой погрешности существенно зависит от режима сварки. Измерения показали, что при сварке сплава АМгб на различных режимах погрешность $V_{кр}$, создаваемая формоизменением образца, составляет 25-90% от критической скорости.

сти машинной деформации при соответствующем увеличении скорости сварки в пределах 6 + 36 м/час (таблица I).

Таблица №1.

Скорость сварки, м/час.	6	12	24	36
A, мм/мин.	2,3	3,8	6,3	4,1
V _{ср.а.} , мм/мин.	0,6	0,7	3,1	3,9

Перемещения свариваемых кромок образца, создаваемые формоизменением образца, могут быть замерены как контактными, так и бесконтактными способами измерений деформаций на базе, равной ширине шва. По мере накопления экспериментальных данных скорость перемещения свариваемых кромок образца может быть определена с помощью номограмм или расчетным путем.

С учетом вышеизложенного появляется возможность оценить технологическую прочность при изменении режима или способа сварки. Для этого необходимо подсчитать темп перемещения свариваемых кромок образца с учетом деформации его формоизменения:

$$\alpha_{кр} = \frac{V_{кр}}{C} = \frac{A \pm V_{ср.а.}}{C},$$

где A - критическая скорость перемещения захвата машины, приводящая к возникновению горячей трещины, (мм/мин);

V_{ср.а.} - средняя скорость относительного перемещения свариваемых кромок, создаваемая деформацией формоизменения образца при кристаллизации, (мм/мин); она берется со знаком "+", если без принудительного растяжения наблюдается расхождение свариваемых кромок образца;

C - средняя скорость охлаждения металла шва в интервале кристаллизации, (°C/мин).

Итак, для сравнения технологической прочности сплавов, сваренных на различных режимах необходимо определить, кроме критической скорости машинной деформации "A" и скорости охлаждения металла шва в интервале кристаллизации, среднюю скорость перемещения свариваемых кромок образца, создаваемую деформацией формоизменения образца в результате его нагрева дугой.

При сравнении сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин для сплавов одной основы, сваренных на одинаковых режимах, но отличающихся химическим составом металла шва, например, за счет введения различных присадочных металлов, V_{ср.а.} и C являются величинами постоянными и их можно не учитывать.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ.

С помощью предложенного выше показателя $\alpha_{кр}$ оценена сопротив-

ляемость металла шва образованию горячих трещин для ряда промышленных (АМг6, АМг6-2, АМц, М-40) и модельных сплавов алюминия с 0,5, 5 и 8% меди. Получено, что с увеличением скорости сварки в диапазоне 6-48 м/час показатель технологической прочности для большинства исследуемых сплавов снижается (рис. 2, г). Полученные данные хорошо соответствуют результатам практики и оценке стойкости сплавов с помощью жестких проб (круговая и др.). Снижение сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин для большинства исследуемых сплавов при увеличении скорости сварки объясняется неблагоприятным изменением схемы кристаллизации, приводящей к резкому уменьшению пластичности сварного шва в ТИХ и возрастанию концентрации деформации в центре шва. Внешним признаком является выпрямление изотерм кристаллизации и их пересечение в центре шва под острым углом.

Другие зависимости получены при исследовании низколегированных сплавов АМц и А2-0,5%Си. У сплава АМц с увеличением скорости сварки показатель технологической прочности изменяется по кривой с максимумом, наблюдаемым при скорости 20-30 м/час. Увеличение показателя для этого сплава с ростом скорости сварки от 6 до 20 м/час объясняется повышением пластичности металла шва в ТИХ. У сплава А2-0,5%Си этот показатель в исследуемом диапазоне скоростей сварки возрастает, хотя и незначительно. Это, по-видимому, объясняется тем, что в этих условиях пластичность металла шва в ТИХ практически не менялась (рис. 2, в), но сужался интервал образования горячих трещин.

Итак, величина предлагаемого показателя зависит от отдельных параметров, что также подтверждает его достоверность.

ОЦЕНКА ЗАПАСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СВАРКЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

Величина показателя кроме выбора оптимального состава присадки или режима сварки, обеспечивающего наибольшую сопротивляемость металлу шва против образования горячих трещин может определять запас технологической прочности сварной конструкции. Величина показателя равна запасу, если деформации формоизменения образца и конструкции одинаковы. Однако, большое разнообразие конструкций и требования к унификации образцов в большинстве случаев не обеспечивает этого условия. Для решения поставленной задачи определяли деформации формоизменения металла шва в зонах повышенной вероятности образования горячих трещин для некоторых типовых конструкций: 1. при изменении режима сварки прямолинейного и кругового шва; 2. при изменении диаметра кругового шва; 3. в различных зонах сварного шва (в начале, середине и конце шва). Для определения запаса технологической прочности сварной конструкции α_d сопоставляли темп деформации формоизме-

нения шва конструкции $d_{\text{фк}}$ с величиной показателя технологической прочности шва ($d_3 = d_{\text{кр}} + d_{\text{фк}}$). Получено, что для большинства исследуемых сплавов запас технологической прочности уменьшается при возрастании скорости сварки и при уменьшении диаметра кругового шва; он минимален в начале и конце прямолинейного и кругового шва.

По результатам проведенной работы составлена инструкция, которая послужит основой для дополнения к проекту ГОСТ, на методику оценки технологической прочности сплавов при изменении режима или способа сварки. Элементы разработанного критерия технологической прочности сплавов при сварке уже применяются в ряде организаций СССР: КПИ, ГПИ, МВТУ им. Баумана и др. Использование разработанной в настоящей работе методики позволило рекомендовать режимы сварки, обеспечивающие отсутствие горячих трещин при сварке фланцев. Внедрение этих режимов только на одном из заводов авиационной промышленности позволило получить экономический эффект в 50 тыс. рублей. Предлагаемая методика оценки технологической прочности рекомендуется при выборе режима сварки, обеспечивающего высокую стойкость сварной конструкции против образования горячих трещин, и при выборе новых перспективных способов сварки: сварка трехфазной и плазменной дугой, электронным лучом, сварка импульсной дугой и т.д.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Применению форсированных высокопроизводительных режимов дуговой сварки препятствует образование дефектов типа горячих трещин. Для анализа причин этого явления исследовано, с позиций теории технологической прочности, влияние режима сварки на границы ТИХ, в котором образуются горячие трещины, а также на пластичность и величину деформации металла шва в этом интервале.

2. Разработан бесконтактный метод измерения деформаций, позволяющий исследовать деформационную обстановку в условиях твердо-жидкого состояния металла шва. С помощью этого метода установлена связь между распределением внутренней деформации металла шва в ТИХ и схемой кристаллизации. При сварке с малой скоростью (6 м/час), когда кристаллиты срастаются под малым углом, все участки шва претерпевают значительную внутреннюю деформацию, распределенную по сечению шва. При сварке со скоростью 12-24 м/час, когда в центре шва образуется стик "осевых" и боковых кристаллитов, срастающихся под малым углом, усиливается неравномерность распределения внутренней деформации по сечению шва за счет ее концентрации на стыке срастания "осевых" и боковых кристаллитов. При увеличении скорости сварки до 36-48 м/час, когда боковые кристаллиты срастаются навстречу друг другу под большим углом, деформация концентрируется лишь в центре шва, что

является одной из причин снижения пластичности швов и их стойкости против образования горячих трещин.

3. Исследовано влияние режима сварки на положение нижней границы ТИХ. Установлено, что на положение нижней границы ТИХ скорость сварки влияет лишь для однофазных сплавов; для сплавов с равновесной и неравновесной эвтектикой нижняя граница ТИХ практически не зависит от режима сварки, а, следовательно, и от схемы кристаллизации.

4. Установлено, что для большинства исследуемых сплавов (АМгЗ, АМг6, М-40, АЛ-5%Си, АЛ-8%Си), увеличение скорости сварки резко снижает пластичность металла шва в ТИХ в поперечном направлении, что связано с неблагоприятным изменением схемы кристаллизации и резким возрастанием концентрации деформации в центре шва.

5. Предложена новая методика определения показателя технологической прочности в условиях изменения режима или способа сварки. Показана сопоставимость величины этого показателя, определенного на различных режимах сварки, с данными о склонности к горячим трещинам, полученными на пробах и опытных конструкциях.

6. Для ряда сплавов выявлены области режимов с максимальной сопротивляемостью образованию горячих трещин. Получено, что с увеличением скорости сварки в диапазоне 6-48 м/час показатель технологической прочности для сплавов АМг6, АМг6-2, М-40, АЛ-5%Си, АЛ-8%Си снижается. Для сплавов АМц и АЛ-0,5%Си максимальная сопротивляемость образованию горячих трещин наблюдается при скорости сварки 20-30 м/час.

7. По материалам работы составлена инструкция на методику оценки технологической прочности сплавов при изменении режима или способа сварки, на которую получены положительные отзывы и акты внедрения в ряде организаций.

8. Разработана методика определения запаса технологической прочности конструкций. Установлено, что запас технологической прочности конструкций с круговыми швами снижается при увеличении скорости сварки для большинства исследуемых алюминиевых сплавов и при уменьшении диаметра кругового шва. На основании полученных результатов даны рекомендации по повышению запаса технологической прочности, внедрение которых только на одном из заводов авиационной промышленности позволило получить экономический эффект в 50 тыс. рублей.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Якушин Б.Ф., Чернавский Д.М. Влияние жесткости образца и режима наплавки на деформации металла шва, материалы семинара "Сварка и резка цветных металлов и сплавов", МДНП, М., 1972.
2. Якушин Б.Ф., Чернавский Д.М. Влияние режима сварки на технологическую прочность алюминиевых сплавов, "Сварочное про-во", №11, 1972.

3. Якушин Б.Ф., Чернавский Д.М., Алешин О.П., Прохоров Н.Н. Влияние режима сварки на технологическую прочность металла шва, тезисы докл. Всесоюзной межвузовской конференции, М., 1973.
4. Прохоров Н.Н., Якушин Б.Ф., Чернавский Д.М. Способ нанесения на поверхность исследуемого материала базовых меток, Авторское свидетельство №371425, Бюллетень №12, стр.115, 1973.
5. Чернавский Д.М., Якушин Б.Ф. Измерение перемещений при затвердевании металла шва, "Автоматическая сварка", №2, 1973.

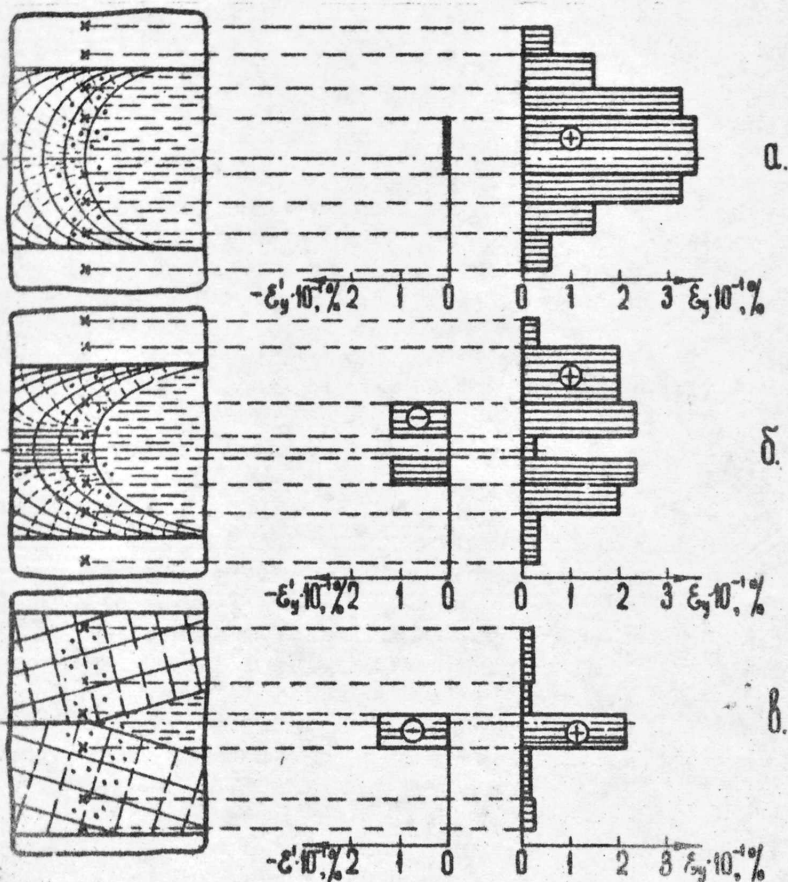


Рис.1. Влияние скорости сварки на схему кристаллизации металла шва и распределение по сечению шва внутренней деформации (ϵ_y), накопленной в ТИХ: а. $v_s = 6$ м/час; б. $v_s = 12$ м/час; в. $v_s = 36$ м/час.
 ϵ_y' — деформация формоизменения (относительное изменение размеров базы в ТИХ) металла шва в зоне вероятного возникновения трещин;
 * — крестиками показаны отметки баз.

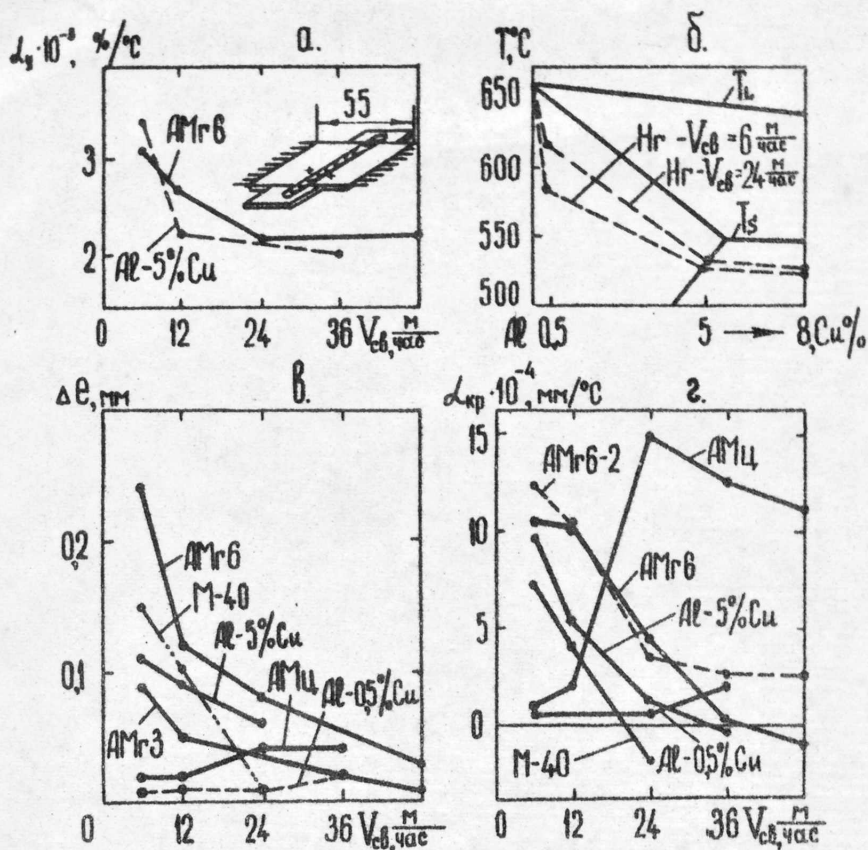


Рис.2. Влияние скорости сварки на темп внутренней деформации металла в центре шва при сварке образцов, закрепленных по контуру (а), на положение нижней границы ТИХ относительно равновесного солидуса и ликвидуса для сплавов Al-Cu (б), на пластичность металла шва (в) и его стойкость против образования горячих продольных трещин (г).