

1554052

На правах рукописи

НАСТИЧ Сергей Юрьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ  
AL-MG-LI СПЛАВОВ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ

Специальность 05.03.06. - Технология и машины сварочного  
производства

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Настич*

Москва - 1997

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана и Всероссийском институте авиационных материалов

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент ЯКУШИН В.Ф.

Научный консультант - кандидат технических наук,  
с.н.с. ЛУКИН В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор БАДЬЯНОВ В.Н.,  
кандидат технических наук,  
доцент МИХУРОВ А.И.

Ведущее предприятие - НПО им. Лавочкина

Защита диссертации состоится "15" мая 1997 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 053.15.03 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва.

Ваш отзыв на автореферат  
сим выслать по указанию  
С диссертацией  
им.Н.Э.Баумана.

Телефон для справок

Автореферат разослан

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
К.Т.Н., доцент

Подписано \_\_\_\_\_ к п.

Тип. МГТУ Тираж \_\_\_\_\_

1554052

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сверхлегкие высокопрочные термоупрочняемые алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Li типа 1420 являются перспективным конструкционным материалом для изделий авиа-космической техники, поскольку они обладают повышенными удельными характеристиками прочности и упругости по сравнению с деформируемыми алюминиевыми сплавами системы Al-Mg. Сварные конструкции этого типа относятся к изделиям ответственного назначения, что обуславливает высокие требования к надежности сварных соединений. Однако при введении Li (1,8-2,3 %) усложняется химический и фазовый состав сплавов и наблюдается снижение их свариваемости, проявляющееся в увеличении склонности к горячим трещинам.

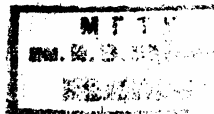
При сварке полуфабрикатов из сплавов типа 1420, полученных деформированием, наиболее вероятным видом дефектов являются горячие трещины в околосшовной зоне (ОШЗ) и по зоне сплавления. Исправление этих дефектов наиболее трудоемко, а технологические и металлургические способы их предотвращения весьма ограничены. По современным представлениям, сопротивляемость Al-Mg-Li сплавов горячим трещинам в ОШЗ и по зоне сплавления определяется нерегулируемыми при сварке химическим составом и структурой полуфабрикатов.

Особенностью полуфабрикатов из Al-Mg-Li сплавов, вызывающей повышенный риск образования горячих трещин, является наличие значительной межкристаллитной ликвационной неоднородности по Mg и Li, формирующейся при затвердевании и при горячей пластической деформации, уровень которой различен в отдельных участках кованых, прессованных и штампованных полуфабрикатов.

Для обеспечения свариваемости полуфабрикатов из Al-Mg-Li сплавов необходимы количественные сведения о комплексе показателей свариваемости при изменении степени ликвационной неоднородности полуфабрикатов по Mg и Li, состоящем из показателей сплошности и прочности сварных соединений.

Цель работы. Повышение свариваемости Al-Mg-Li сплавов путем снижения уровня ликвационной неоднородности в зоне сварки и учета исходной структуры полуфабрикатов.

Методы исследования. Варьирование уровня ликвационной неоднородности осуществлялось путем применения в исследованиях свариваемости модельных сплавов, в которых изменялось содержание



магния (2,8-6,4%), лития (1,35-3,20%) и скандия (0-0,19%). Сопротивляемость образованию горячих трещин в ОИЗ определялась показателями "Температура нижней границы температурного интервала хрупкости" ( $T_{нГТХ}$ ) и "Критический темп деформации" ( $V_{кр}$ ), полученными путем моделирования термо-деформационного цикла сварки электродноконтактным нагревом, а также показателем "Критическая скорость растяжения" ( $V_{кр}$ ), измеряемым по ГОСТ 26 389-84 (растяжение металла шва в процессе кристаллизации). Температура измерялась при помощи зачеканенной в шейку образца термопары хромель-алюмель диаметром 0,2 мм и фиксировалась прибором КСП-4 и микропроцессорной АСУ машины МИС-1М. Темп деформации оценивался по абсолютному удлинению в связи с наличием тепловой и механической неоднородности образцов при сварке и при имитационном нагреве. Статистическая обработка данных проведена по методу наименьших квадратов. Испытания на малоцикловую усталость при знакопостоянной растягивающей нагрузке с отношением  $R_{max}/R_{min}=0,3$  и прочность при статическом растяжении проводились на испытательной машине EUS-100 (Германия). Коррозионная стойкость оценивалась по времени до разрушения при выдержке под растягивающими напряжениями в коррозионной среде ( $3\%NaCl+0,1\%CH_3COOH+0,1\%CH_3COONa$ ). Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе "Versamet-2 UNION 7455" фирмы "Meiritsu Seiki" (Япония). При этом зеренное строение металла выявлялось с помощью цветного травления (анодное окислирование в электролите бoro-фтористой кислоты, травление  $HCl$  или концентрированной  $H_2PO_4$ ).

Научная новизна. В результате проведенных комплексных исследований свариваемости Al-Mg-Li модельных сплавов типа 1420, содержащих 1,35-3,20% Li и 2,8-6,4% Mg и свариваемых аргоно-дуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочным металлом согласно технологическим рекомендациям НИАТ и ВИАМ, установлено, что:

- повышение содержания Li  $> 2\%$  при 5,5-6,5% Mg приводит к формированию на границах зерен ликвационных полос из s-фазы ( $Al_2MgLi$ ), что вдвое уменьшает сопротивляемость горячим трещинам в ОИЗ для зон ликвационной неоднородности горячедеформированных полуфабрикатов (штамповок и поковок) по сравнению с тонколистовым прокатом того же сплава в связи с расширением температурного

2

интервала хрупкости (ТХ) до температур 525-530°C;

- сечения поверхностей  $B_{кр}=f([\%Mg], [L1])$  и  $T_{нТХ}=f([\%Mg], [L1])$  плоскостями постоянных концентраций Mg и L1 представляют собой нисходящие части парабол;

- существует пропорциональная связь между прочностью в ОШЗ и запасом деформационной способности металла ОШЗ в ТХ, проявляющаяся в снижении прочности сварного соединения при частичном исчерпании пластичности металла в ТХ, вызываемом повышенной ликвацией (при содержании  $Mg > 6,0\%$  и  $L1 > 2,0\%$ ) или интенсивным развитием сварочных деформаций.

#### Практическая ценность работы:

- создано лабораторное компьютеризированное оборудование для испытаний на срачиваемость металла ОШЗ по методике имитации сварочного цикла;

- получены количественные зависимости сопротивляемости горячим трещинам в ОШЗ от степени ликвационной неоднородности полуфабрикатов, обусловленной изменением содержания L1 и Mg;

- установлена зависимость механических свойств сварных соединений из Al-Mg-L1 сплавов от степени исчерпания деформационной способности в температурном интервале хрупкости;

- разработаны рекомендации по повышению надежности и свариваемости конструкций из горячедеформированных полуфабрикатов Al-Mg-L1 сплавов путем регулирования химического состава и исходной структуры сплавов.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на российской научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники "Сварка-95"" проводимой ПГТУ в г.Пермь и на заседании кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им.Н.Э.Баумана 12.05.1995.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и приложений. Выполнена на 117 машинописных листах, содержит 53 рисунка, 15 таблиц и 112 наименований использованных литературных источников.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Глава 1. Посвящена анализу проблем, возникающих при сварке несущих конструкций типа баков-отсеков из полуфабрикатов Al-Mg-L1 сплавов типа 1420 (содержащих 4,5-6,0% Mg и 1,9-2,3%

Li). Рассмотрены характеристики сплавов, особенности структурного строения полуфабрикатов, а также вероятные причины и механизм образования горячих трещин по зоне сплавления и в ОШЗ сварных соединений Al-Mg-Li сплавов. Показана необходимость оценки влияния ликвационной неоднородности и исходной структуры полуфабрикатов на сопротивляемость образованию горячих трещин в ОШЗ и по зоне сплавления.

Применение несущих штампо-сварных конструкций из сверхлегких высокопрочных Al-Mg-Li сплавов типа 1420 позволило повысить характеристики авиа-космической техники. Однако, это вызвало проблему появления дефектов типа горячих трещин в ОШЗ. Они вызывают наибольшие трудности при сварке, в том числе при исправлении дефектов из-за недопустимости многократных подварок.

Проблеме повышения свариваемости Al-Mg-Li сплавов посвящены работы Денисова В.С., Илюшенко Р.В., Ищенко А.Я., Лукина В.И., Овчинникова В.В., Патона В.Е., Рязанцева В.И., Фридляндера И.Н., С.Е. Cross, J.R. Pickens, E.W. Lee, J.J. Witters и др., в которых определены составы сплавов и технология их сварки, позволяющие предотвратить поры и горячие трещины. В этих работах не определены количественные показатели механических свойств в ТИХ, что затрудняет идентификацию возникающих горячих трещин. Поскольку сопротивляемость горячим трещинам основного металла определяется металлургическими факторами, т.е. химическим составом и структурой полуфабрикатов, то при случайном образовании горячих трещин в ОШЗ правомерно назвать ряд причин: непостоянство химического состава свариваемых заготовок из-за ликвационной неоднородности; окисление границ зерен; укрупнение зерен вследствие аномалий горячего деформирования и рекристаллизации, в том числе при сварочном нагреве; увеличение темпа деформации в ТИХ вследствие затрудненной усадки.

Основной причиной горячих трещин в ОШЗ следует считать ликвационную неоднородность, проявляющуюся в локальном повышении концентрации Mg и Li в отдельных зонах на границах зерен и образовании полос интерметаллидной  $\delta$ -фазы ( $Al_2MgLi$ ). Возникновение ликвационной неоднородности возможно при литье, а ее усиление - при изготовлении полуфабрикатов деформированием, так как в зонах интенсивного течения и локального перегрева металла происходит обогащение границ зерен атомами Li и Mg с образованием  $\delta$ -фазы.

При сварке концентрация Mg и Li на границах зерен повышается под действием термического цикла из-за процессов растворения  $\delta'$ -фазы ( $Al_3Li$ ) и дополнительного образования  $\delta$ -фазы, диффузии, контактного плавления между интерметаллидами и твердым раствором. В условиях стесненной усадки на оплавленных границах зерен образуются рыхлоты, являющиеся очагами горячих трещин.

Решение проблемы свариваемости полуфабрикатов Al-Mg-Li сплавов может быть достигнуто в результате комплексной оценки различных показателей свариваемости, с помощью которых будет оптимизирован химсостав свариваемого металла, даны рекомендации по снижению ликвационной неоднородности полуфабрикатов и ослаблению технологического наследования.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Выбор метода испытаний и совершенствование оборудования для получения зависимостей количественных показателей сопротивляемости образованию горячих трещин от ликвационной неоднородности для основного металла и металла зоны сплавления.

2. Определение влияния химического состава металла шва и ОШЗ на показатели свариваемости.

3. Выявление степени влияния исходной структуры и фактора технологического наследования, т.е. суммарной поврежденности металла ОШЗ при сварке на прочность сварных конструкций.

4. Разработка рекомендаций по повышению технологической прочности при сварке на надежность конструкций из Al-Mg-Li сплавов типа 1420.

Глава 2. Посвящена выбору показателей сопротивляемости горячим трещинам и методик испытаний для получения этих показателей.

Для комплексной оценки свариваемости необходимо осуществить количественную оценку сопротивляемости металла шва и зоны термического влияния к образованию горячих трещин по показателям, физически связанным с образованием горячих трещин и характеристиками металла в ТИХ, а также обеспечить воспроизводимость результатов и максимально возможную чувствительность.

В главе дана классификация методов испытаний на горячие трещины, интенсивно развивающихся в различных странах и базирующихся на теории технологической прочности Прохорова Н.Н. Рассмотрены показатели сопротивляемости горячим трещинам, представ-

ленные в работах Новикова И.И., Шоршорова М.Х., Чернышовой Т.А., Якушина Б.Ф., Wilken K., Granjon H. и др. Развивающиеся современные методы оценки сопротивляемости горячим трещинам разделяются на несколько групп: технологические, машинные, расчетно-экспериментальные и расчетно-статистические. Из-за отсутствия достаточной базы данных по сопротивляемости горячим трещинам по зоне сплавления и в ОВЗ сплавов типа 1420, для решения задач настоящего исследования выбран экспериментальный метод оценки, позволяющий накопить данные для расчетно-статистической оценки.

Экспериментальные методы оценки делят на качественные и количественные. В технологических методах испытаний используют естественное нагружение от усадки при сварке, а в машинных - нагружение внешними силами с контролируемой динамикой. Преимущество машинных испытаний - количественные и воспроизводимые результаты, позволяющие сравнивать материалы друг с другом и получать функциональные зависимости.

При машинных испытаниях с использованием внешнего нагружения необходимо произвести моделирование термо-механических параметров сварочного цикла. С целью упрощения выбрано точно дозируемое внешнее нагружение, а неизбежное нагружение образца от собственной усадки (закрепления) поддерживается малым по сравнению с уровнем внешнего нагружения, что достигается особой формой образца, отдельным измерением деформации от температурной усадки и (или) системой управления оборудованием. Таким образом, можно отделить факторы структуры, металлургии от факторов нагружения, изучить и количественно измерить воздействие отдельных факторов.

При машинных испытаниях за критерий образования горячих трещин обычно принимают критический темп деформации ( $V_{кр}$ ), критическую деформацию ( $\epsilon_{кр}$ ) и суммарную (TCL) или максимальную (MCL) длину трещин. Показатели, учитывающие длину трещин и применяемые в зарубежных методиках испытаний изгибом, являются условными, так как не имеют физической связи с характеристиками металла в ТИХ. Поэтому, наиболее обоснованно применение критерия  $V_{кр}$ . Упрощенным вариантом этого типа испытаний является определение критической скорости растяжения ( $V_{кр}$  или  $A_{кр}$ ), при этом невозможно сравнить показатели  $A_{кр}$ , полученные с разными термическими циклами сварки, т.к. при линейном задании темпа машинной деформации во времени накопленное значение деформации в ТИХ за-

висит от времени пребывания в нем сварного шва.

Критический темп деформации, определяемый при нарастании перемещений по линейному закону в ТИХ, равен отношению критической величины перемещения кромок свариваемых элементов в ТИХ к протяженности ТИХ. Показатель  $V_{кр}$  пригоден для сравнения сопротивляемости горячим трещинам независимо от условий испытаний при его определении, поскольку он зависит только от пластичности металла и протяженности ТИХ.

В экспресс-методе испытаний выбрано определение показателя  $V_{кр}$  в режиме имитации в образцах термо-деформационных циклов сварки. Метод универсален и позволяет проводить количественную оценку свариваемости металла шва и зоне термического влияния по всем показателям технологической и эксплуатационной прочности, регулировать в широких пределах силовой и тепловой факторы сварочного цикла в независимых соотношениях, воспроизводить циклы любых способов сварки в сочетании с промежуточной термообработкой. Отмечается сокращение затрат времени, труда и материалов.

В настоящей работе впервые для оценки сопротивляемости горячим трещинам металла ОШЗ алюминиевых сплавов применен показатель  $V_{кр}$  наряду с дополнительным показателем  $T_{гТИХ}$ . Это стало возможным благодаря использованию нового компьютеризированного оборудования, воспроизводящего термические циклы металла ОШЗ с точностью  $\pm 1...3^\circ\text{C}$ , поскольку у сплавов со сложным фазовым составом температура плавления интерметаллидных фаз ниже температуры солидуса матрицы и сильно зависит от колебаний химического состава сплавов.

Первой особенностью применяемой методики является схема нагружения растяжением, которая позволяет определять прочность испытуемого металла, в отличие от нагружения изгибом, применяемого в зарубежных методиках Transvarestraint, Varestraint, MVT и др. Вторая особенность методики состоит в комбинации двух испытаний: растяжение образца при имитации термо-деформационного цикла сварки и растяжение кристаллизующегося сварного соединения (МВТУ-ЛТП-1). Это позволило оценить прочность сопряженных зон в ТИХ, т.е. определить свариваемость соединения как в целом, так и отдельных его зон (шва, зоны сплавления и ОШЗ) и исследовать свойства одного образца в условиях суммирования пластической деформации при различных температурах, т.е. в условиях технологи-

ческого наследования.

Глава 3. Посвящена исследованию влияния ликвационной неоднородности металла сплавов на сопротивляемость образованию горячих трещин.

Влиянию ликвационной неоднородности и поврежденности кристаллического строения полуфабрикатов на свойства Al-Mg-Li сплавов посвящены работы Лукина В.И., Грушко О.Е., Денисова В.С., однако в них не содержатся данные по количественной оценке свариваемости сплавов с зонами повышенного содержания Mg и Li.

Химический состав свариваемого сплава является решающим фактором сопротивляемости образованию горячих трещин в ОШЗ и по зоне сплавления, так как эти зоны не подвергаются металлургическому воздействию через присадочную проволоку, а разрушение как правило идет по зоне сплавления и основному металлу.

Для оценки связи ликвационной неоднородности с показателями свариваемости необходимо выявить одиночное и совместное влияние Li и Mg на эти показатели в сплавах без Sc и со Sc при содержании легирующих и примесных элементов (Zr, Si, Ca, Na, Fe) в определенных паспортом сплава 1420 пределах. Это было выполнено путем изготовления и испытаний на свариваемость комплекта модельных сплавов, химический состав которых имел варьирование в пределах 2,8-6,4% Mg и 1,35-3,20% Li для воспроизведения дисперсии химического состава полуфабрикатов при ликвации Mg и Li.

При исследовании сопротивляемости образованию горячих трещин сложнолегированных сплавов важно знать температурные интервалы хрупкости и кристаллизации сплавов и проводить испытания в этих интервалах. Интервалы кристаллизации определяли с помощью дифференциального термического анализа по методике института им. Байкова. Установлено, что повышение содержания Mg и Li приводит к увеличению объема легкоплавких интерметаллидных фаз и их эвтектик с твердым раствором, которое понижает температуру равновесного солидуса с 544 до 510°C при изменении Li от 1,35 до 3,2%, а Mg от 2,8 до 6,4%. Эффективный интервал кристаллизации и ТИХ расширяются, и повышается вероятность образования горячих трещин в ОШЗ.

Испытания на определение температуры, нижней границы ТИХ (Т<sub>нг-тих</sub>) для выявления протяженности ТИХ проводились на образцах размером 180x18x2,2 мм с шейкой. Эксперимент проводили на новой

испытательной машине МИС-1М, оборудованной АСУ от встроенного микропроцессора, что позволило выдерживать один термический цикл для всех образцов партии с точностью  $\pm 1...3^{\circ}\text{C}$ . Нагрев образцов осуществлялся проходящим через них электрическим током.

Для определения  $T_{\text{НГТИХ}}$  образцы из основного металла предварительно переводили в структурное состояние металла ОШЗ вблизи линии сплавления путем имитации термического цикла сварки, рассчитанного по программе на ЭВМ. Значения  $T_{\text{НГТИХ}}$  находили по температуре резкого падения прочности металла на этапе нагрева по термическому циклу со скоростью, соответствующей участку ОШЗ у линии сплавления. Нагружение и разрушение образцов осуществлялось за счет энергии сжатой пружины. Наименьшая  $T_{\text{НГТИХ}}$  составляла  $520^{\circ}\text{C}$ , что не противоречит данным дифференциального термического анализа (плавление фаз на границах зерен при нагреве происходит при  $520^{\circ}\text{C}$ , а кристаллизация - при  $510^{\circ}\text{C}$ ).

По описанной методике также определялось изменение пластичности сплавов вблизи  $T_{\text{НГТИХ}}$  по относительному сужению ( $\psi$ ). Площадь поперечного сечения шейки образцов измерялась на оптическом микроскопе после имитации термического цикла сварки ( $S_1$ ) и после разрыва образцов при повторном нагреве под нагрузкой ( $S_2$ ). Выявлено, что температуры резкого снижения прочности и пластичности для исследованных модельных Al-Mg-Li сплавов практически совпадают. Показано, что количественная оценка пластичности Al-Mg-Li сплавов вблизи  $T_{\text{НГТИХ}}$  затруднена из-за особенностей сплавов: газовой пористости, склонности к расслоениям при температурах более  $500^{\circ}\text{C}$  и интенсивного окисления поверхности образцов.

Критический темп деформации в ТИХ определяли на описанных выше образцах с использованием машины МИС-1М при имитации термодеформационного сварочного цикла. После достижения максимальной температуры, определяемой по расчетной программе для точки ОШЗ у линии сплавления, образцы растягивали на этапе охлаждения до  $T_{\text{НГТИХ}}$  с увеличивающейся в серии образцов скоростью. Использование в АСУ машины МИС-1М обратной связи по усилию и перемещению позволяло отрабатывать механизмом растяжения деформацию от температурной усадки.

По результатам испытаний на определение  $T_{\text{НГТИХ}}$  и  $V_{\text{кр}}$  получены регрессионные зависимости (по методу наименьших квадратов):  
$$T_{\text{НГТИХ}} = 772,22 + 7,85 \cdot (\% \text{Mg}) - 125,38 \cdot (\% \text{Li}) - 1,04 \cdot (\% \text{Mg})^2 +$$

$$+ 20,49 * (\%Li)^2 - 5,51 * (\%Mg) * (\%Li), \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$V_{кр} = 0,03404 + 0,00171 * (\%Mg) - 0,01599 * (\%Li) + 0,00033 * (\%Mg)^2 +$$

$$+ 0,00446 * (\%Li)^2 - 0,00269 * (\%Mg) * (\%Li), \text{ мм/}^{\circ}\text{C}$$

Сечения, поверхностей ТИХ-тих и  $V_{кр}$  плоскостями постоянных концентраций Mg и Li представляют собой нисходящие части парабол. Легирование сплавов 0,15-0,20% Sc позволяет уменьшить ширину ТИХ на 25-30 $^{\circ}\text{C}$  и повысить  $V_{кр}$  на 40-50%.

Для определения взаимного влияния основного и присадочного металлов на образование горячих трещин в сварном соединении проводились испытания по методике МВТУ-ЛТП-1, предусматривающей растяжение кристаллизующегося металла сварного соединения с определением критической скорости растяжения  $V_{кр}$  (или  $A_{кр}$ ).

Результаты испытаний по методике МВТУ-ЛТП-1 подтверждают повышение сопротивляемости образованию горячих трещин у сплавов, содержащих до 0,2% Sc по сравнению со сплавами без Sc как в случае сварки с серийной присадочной проволокой Св АМг63, так и при сварке без присадки и с присадочной проволокой аналогичного химического состава. При микроструктурном анализе сварных соединений отмечено, что в зоне сплавления сплавов со Sc размер зерна на порядок мельче, чем у сплавов без Sc.

Выявленное расширение ТИХ и снижение сопротивляемости горячим трещинам при увеличении содержания Li и Mg в исследованных модельных сплавах подтверждает предположение о решающей роли ликвационной неоднородности полуфабрикатов по Li и Mg в процессе образования в ОШЗ Al-Mg-Li сплавов горячих трещин, которые относятся к ликвационному типу.

**Глава 4.** Посвящена исследованию прочности сварных соединений Al-Mg-Li сплавов в зависимости от исчерпания деформационной способности металла в ТИХ под воздействием термо-деформационного сварочного цикла по принципу технологического наследования.

В сварных конструкциях летательных аппаратов, являющихся изделиями ответственного назначения, вероятно снижение прочности под действием сварочного цикла. В работах Волченко В.Н. показана возможность оценки потенциальной надежности сварных соединений после изменений, которые вносятся в основной металл технологическим процессом сварки.

По гипотезе Якушина В.Ф. надежность сварных конструкций может снижаться в результате суммирования поврежденности металла

на различных этапах термо-деформационного цикла сварки и последующей эксплуатации. В результате этого возможно накопление дефектов структуры, не выявляемых при неразрушающем контроле, и падение уровня эксплуатационных структурно-чувствительных свойств сварного соединения.

Анализ литературных данных показывает, что основные изменения структурного и фазового состояния, вызывающие склонность к образованию горячих трещин при сварке, металл Al-Mg-Li сплавов приобретает на стадии горячего деформирования полуфабрикатов. Начальная поврежденность в металле может усиливаться при сварке из-за частичного истощения деформационной способности металла преимущественно в ТИХ. Следующий этап накопления поврежденности - при термообработке сварного соединения, а затем - при эксплуатации.

Согласно гипотезе о технологическом наследовании суммированные высокотемпературные повреждения кристаллического строения с низкотемпературными возможно из-за одинакового механизма пластической деформации - межзеренного проскальзывания. Согласно Чернышовой Т.А., при внутризеренной деформации происходит выход дислокаций на границы зерен с образованием на них клиновидных пор и повышения сегрегации примесей на границах, что усиливает склонность к межзеренному проскальзыванию и к снижению структурно-чувствительных механических свойств.

Поскольку в зонах ликвационной неоднородности полуфабрикатов Al-Mg-Li сплавов отмечено снижение показателей сопротивляемости горячим трещинам, то в этих зонах запас деформационной способности сплава снижен. При совпадении мест сварки с зонами ликвационной неоднородности, что адекватно сварке при интенсивном развитии сварочных деформаций, может происходить частичное истощение запаса деформационной способности, что при отсутствии горячих трещин вызывает снижение эксплуатационных свойств.

Предполагалось наличие нелинейной зависимости механических структурночувствительных свойств от интенсивности высокотемпературных деформаций:  $\delta_1 = f((d\epsilon_1/dT)/(d\epsilon_{кр}/dT))$ . По предварительным результатам существенное снижение свойств отмечалось при  $k > 0,5$ .

Оценивали степень снижения эксплуатационных структурно-чувствительных свойств сварных соединений (коррозионной стойкости и малоциклового усталости) по отношению к основному металлу

для образцов с различным уровнем запаса технологической прочности. Для определения зависимостей этих свойств от истощения деформационной способности металла для каждого эксперимента были подготовлены образцы, подвергнутые воздействию термо-деформационного цикла сварки с темпом деформации в ТИХ  $V=0,8 \cdot V_{кр}$ , т.е. без зародышей горячих трещин, что подтверждено результатами ультразвукового контроля, проведенного в лаборатории контроля МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Испытания на коррозионную стойкость проводились в специально изготовленном рычажном приспособлении. По результатам испытаний, образцы, подвергнутые только термическому циклу, проявили снижение коррозионной стойкости на 30-40%, а образцы с  $V=0,8 \cdot V_{кр}$  показали снижение еще на 30 %, хотя все образцы по результатам ультразвукового контроля были признаны годными. Испытания на малоцикловую усталость проводились на испытательной машине EUS-100 с частотой нагружения 15 Гц. Выявлено снижение выносливости (до 40 %) для образцов после обработки по термо-деформационному циклу сварки с близким к критическому темпом деформации в ТИХ по сравнению с необработанными образцами.

Анализ фактограмм очага разрушения показал наличие в изломе плоских зон крупного разрушения и меньшей, чем в недеформированном металле, глубины ямок пластической деформации. Это свидетельствует о поврежденности кристаллической структуры металла под действием термо-деформационного цикла сварки с близким к критическому темпом деформации в ТИХ и ее склонности к хрупкому межзеренному разрушению при накоплении поврежденности от процессов сварки и эксплуатации.

Установлено, что в результате подкритического истощения деформационной способности металла сплавов ОШЗ Al-Mg-Li при сварке, происходит заметное снижение эксплуатационных свойств сварных соединений, что может служить причиной уменьшения их надежности. Повышение запаса стойкости против образования горячих трещин является универсальным способом обеспечения как сплошности, так и требуемого уровня механических свойств. Одним из таких мероприятий является легирование сплавов скандием.

Глава 6. Посвящена выработке требований к современному испытательному оборудованию и описанию принципиальных особенностей новой испытательной машины МИС-1М с микропроцессорной АСУ.

Современные высоколегированные сплавы (в том числе сплавы типа 1420) имеют сложный фазовый состав с легкоплавкими неравновесными эвтектическими соединениями и интерметаллидами, у которых температурные границы существования часто располагаются в непосредственной близости друг от друга. Это затрудняет проведение исследований металла ОИЗ и идентификацию дефектов.

Осуществление системной оценки свариваемости предусматривает многократные испытания в различных температурных интервалах хрупкости в соответствии с теорией технологического наследования дефектов при сварке. Методически это осуществляется последовательной оценкой повреждаемости структуры металла, выражающейся в снижении сопротивляемости трещинам различной природы и падении уровня структурно-чувствительных свойств сварного соединения на универсальных образцах, пригодных для различных испытаний.

Новое оборудование должно отличаться повышенной точностью как дозирования нагрева и деформации, так и регистрации и измерения показателей свариваемости. Это достигается при снижении роли субъективного фактора путем применения ЭВМ для управления испытаниями.

В различных странах испытания по методикам с имитацией сварочного цикла проводятся на оборудовании типа MBTU-ЛТП-3, ИМЕТ-ЦНИИЧМ, Thermorestor-W и Gleeble. Эти машины, кроме компьютеризированной Gleeble 3500 (США) последнего поколения, не в полной мере отвечают современным требованиям.

Для комплексной оценки свариваемости различных материалов и оптимизации сварочных процессов в МГТУ им. Н.Э.Баумана при участии автора настоящей работы создана серия опытных образцов испытательных машин серии МИС. В проведенных исследованиях применялась машина МИС-1М, отличающаяся автоматизированной микропроцессорной системой управления.

Машина позволяет проводить испытания по следующим методикам:

- имитация термдеформационного сварочного цикла для оценки механических свойств и критического темпа высокотемпературного деформирования ( $V_{кр}$ ) в условиях шва и околошовной зоны;
- растяжение кристаллизующегося металла шва с различной скоростью для определения  $V_{кр}$  и  $V_{кр}$  с фиксированием сопротивления деформированию по мере охлаждения;
- изгиб кристаллизующегося металла шва на оправке ударом или с

изменяемой скоростью (Transvarestraint, Varestraint) для определения температурного интервала хрупкости (ТИХ).

• Микропроцессорная система управления машиной позволяет воспроизводить задаваемые по программе термо-деформационные циклы с большой точностью ( $\pm 1...3^{\circ}\text{C}$ ), запоминать результаты эксперимента и проводить его просмотр. Машина коммутируется с персональным компьютером типа IBM PC/AT для вывода информации на экран компьютера и последующей обработки результатов.

При имитации сварочного цикла нагрев образца осуществляется электродотактным способом с помощью сварочного трансформатора, управляемого через симистор. Охлаждение образца обеспечивается путем сочетания подогрева и охлаждения при обдуве газом, включаемом с помощью электропневмоклапана.

Высокая четкость воспроизведения термо-деформационного цикла сварки без переходных процессов на переходах к изотермическим выдержкам достигнута применением пропорционально-интегрального закона управления всеми параметрами термического и деформационного циклов.

Выявлена проблема возможного раскачивания системы при изотермических выдержках из-за отклонения частоты сети от стандартного значения при малых углах открытия симистора нагрева. Проблема решена путем отслеживания величины угла открытия симистора как функции от длины полуволны синусоиды напряжения предыдущего шага (отдельно для положительной и отрицательной полуволны). При определении момента включения симистора данного полупериода одновременно определяется длина полуволны для следующего.

Применение новой испытательной машины МИС-1М впервые позволило провести в МГТУ им. Н.Э. Баумана и ВИАМ ряд комплексных исследовательских работ по определению показателей свариваемости сложнолегированных легких сплавов.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании анализа литературных данных установлено, что склонность к образованию горячих трещин в околосварной зоне сварных соединений горячедеформированных полуфабрикатов Al-Mg-Li сплавов типа 1420 обусловлена наличием на границах зерен протяженных строчечных включений  $\delta$ -фазы ( $\text{Al}_2\text{MgLi}$ ), возникающих из-за ликвационной неоднородности сплавов по литию и магнию.

2. Для комплексной оценки свариваемости предложено использовать сочетание методик с имитацией термо-деформационного сварочного цикла и с растяжением кристаллизующегося металла шва. Это позволяет определять: 1) нижнюю границу температурного интервала хрупкости; 2) критический темп деформации в шве и околосшовной зоне; 3) механические свойства сварного соединения в условиях варьирования сварочных деформаций до подкритического уровня.

3. Высокая точность при реализации используемых методик достигнута в результате применения микропроцессорной системы управления испытательным оборудованием. Система отличается регулированием всех параметров термического и деформационного циклов по пропорционально-интегральному закону и точным фазовым управлением включением нагрева.

4. Установлено, что уменьшению сопротивляемости горячим трещинам при содержании  $L1 > 2,2\%$  и  $Mg > 6,4\%$  соответствует снижение температуры нижней границы температурного интервала хрупкости до температуры плавления  $\alpha$ -фазы ( $Al_2MgL1$ ) ( $527^\circ C$ ). Это подтверждает решающую роль количества и расположения  $\alpha$ -фазы в процессе образования ликвационных горячих трещин по зоне сплавления и в околосшовной зоне.

5. Проведена количественная оценка сопротивляемости горячим трещинам по критерию "критический темп деформации". По экспериментальным данным получена следующая регрессионная зависимость: 
$$V_{кр} = 0,03404 + 0,00171 \cdot (\%Mg) - 0,01599 \cdot (\%L1) + 0,00033 \cdot (\%Mg)^2 + 0,00446 \cdot (\%L1)^2 - 0,00269 \cdot (\%Mg) \cdot (\%L1), \text{ мм/}^\circ C.$$

6. Установлено, что сварка по зонам ликвационной неоднородности с содержанием более  $6\%$   $Mg$  и  $2\%$   $L1$  вызывает существенное снижение деформационной способности металла околосшовной зоны. В этом случае при отсутствии горячих трещин в сплавах типа 1420 выявлено снижение структурно-чувствительных эксплуатационных свойств на  $40-60\%$ . Отмеченное явление объясняется накоплением поврежденности кристаллической структуры металла при сварке и эксплуатации.

7. Рекомендуется для повышения надежности ответственных сварных конструкций из горячедеформированных полуфабрикатов  $Al-Mg-L1$  сплавов типа 1420 обеспечивать запас стойкости против образования горячих трещин не ниже  $50\%$  путем выполнения сварки

вне участков ликвационной неоднородности по Mg и Li. Легирование сплавов типа 1420 скандием повышает сопротивляемость горячим трещинам на 40-60% и является универсальным способом обеспечения как сплошности, так и требуемого уровня механических свойств.

8. Разработаны технологические рекомендации, применение которых позволило в лабораторных условиях увеличить сопротивляемость горячим трещинам в околосварной зоне, а также повысить эксплуатационные свойства сварных соединений из Al-Mg-Li сплавов типа 1420.

Испытательная машина МИС-1М с микропроцессорной системой управления внедрена в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Основное содержание диссертации отражено в работах:**

1. Якушин Б.Ф., Настич С.Ю. Совершенствование экспресс-метода оценки свариваемости алюминиевых сплавов // Сварочное производство.- 1995.- N 4.- С. 30-31.

2. Якушин Б.Ф., Настич С.Ю. Технологическое наследование повреждаемости при сварке // Современные проблемы сварочной науки и техники: Материалы российской научно-технической конференции.- Пермь, 1995.- Ч.1.- С. 164-166.

3. Якушин Б.Ф., Хачатуров А.А., Настич С.Ю. Компьютерная имитация термомеханических циклов сварки при испытаниях на свариваемость // Сварочное производство.- 1996.- N 9.- С. 38-40.

4. Лукин В.И., Якушин Б.Ф., Настич С.Ю. О свариваемости сверхлегких Al-Mg-Li сплавов // Сварочное производство.- 1996.- N 12.- С. 15-20.