

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И., Физулаков Р.А., Фролов А.В.
V.I.Muravyev, P.V.Bakhmatov, B.I.Dolotov, R.A.Fizulakov, A.V.Frolov

**ПРОЦЕССЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ**

**NORMALIZATION OF STRUCTURAL NON-UNIFORMITY PROCESSES IN STRUC-
TURAL MATERIALS DURING COMPONENT PART MANUFACTURE**

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail : ktsp@knastu.ru.

Mr. Vassily I. Muravyev – Doctor in Engineering, Professor of the Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доц., доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail : ktsp@knastu.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Долотов Борис Иванович – кандидат технических наук, проф., профессор кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail : ktsp@knastu.ru.

Mr. Boris I. Dolotov – PhD in Engineering, Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Физулаков Роман Анатольевич – кандидат технических наук, доц., доцент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail : ktsp@knastu.ru.

Mr. Roman A. Fizulakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials/New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail : ktsp@knastu.ru.

Mr. Alexey V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлен обзор проведенных исследований коллективом специалистов ГОУВПО «КнАГТУ» и ОАО «Комсомольское на Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» в период с 1968 г. по настоящее время при решении проблем производства качественных и надежных изделий и конструкций летательных аппаратов.

Summary. The paper reviews the studies that have been collaboratively conducted by a group of researchers at Komsomolsk-on-Amur State Technical University and at Yury Gagarin Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant, since 1968 till the present time in the area of solution of the problems of producing high quality and trouble proof aircraft structures.



Ключевые слова: упорядочение, структурная неоднородность, надёжность летательных аппаратов, структурные изменения поверхности, объёмные структурные изменения, термический цикл сварки, дефектная структура, технологический процесс, фазовые превращения.

Key words: normalization, structural non-uniformity, airplane safety, surface structural fluctuations, body structural fluctuations, welding heat cycle, defect structure, production process, phase transformations.

УДК 629.7 : 621.7 : 669.295

Сохранение предшествующей и создание новой упорядоченной поверхностной структурной неоднородности конструкционных материалов [1, 2]

Научным коллективом проводятся систематические исследования существующих и новых процессов структурных изменений в поверхностном слое сталей и сплавов при взаимодействии с нагревающей средой, большой комплекс технологических, проектно-конструкторских и внедренческих работ. По результатам этих работ опубликовано 107 научных трудов, сделано 17 докладов на международных конференциях, приоритеты и новизна исследований подтверждены 23 авторскими свидетельствами и патентами на изобретение. Решая задачи обеспечения заданных физико-химических свойств деталей, сохранения геометрии и высокой точности или придания новой формы, сохранения без изменений поверхностного слоя и минимального уровня напряжений в процессе термического воздействия, были достигнуты следующие результаты.

Воздействие расплавленных солей. На основе проведённых исследований окисляющего, обезуглероживающего и коррозионного воздействия расплавленных солей на стали и сплавы определены закономерности воздействия различных видов раскислителей и установлены максимальное количество и условия введения их в ванну, что позволило вести нагрев под закалку резьбовых деталей, изготовленных по 6-му качеству точности, особенно с мелкой резьбой, пружин, режущего инструмента и других деталей, обеспечивая их высокое качество. При нагреве сталей в расплавленных солях происходит не только адсорбция на поверхности, но и диффузия ионов хлора вглубь. Поэтому промывка значительно влияет не только на точечную и язвенную коррозию, но и на общую коррозию образцов. При этом промывка в горячем водном растворе щёлочи в 5 – 10 раз сокращает скорость коррозии, по сравнению с промывкой в обычной горячей воде.

Применение защитных покрытий. Исследования защитных покрытий проводились с целью защиты резьб у деталей из конструкционных сталей, термическая обработка которых невозможна в соляных ваннах. Наилучшими свойствами обладают стеклоэмалевые покрытия. Испытания технологических свойств стеклоэмалевых покрытий показали, что они растрескиваются и отлетают при закалке в воде, масле и в селитре. Поверхность детали получается чистой, без окалины, что позволило использовать их при нагреве под штамповку, термообработку и др. для защиты поверхности заготовок из конструкционных материалов. Было установлено, что применение стеклоэмалевых покрытий наиболее эффективно вместе с применением предварительного низкотемпературного окисления для титановых заготовок – при нагреве под штамповку практически в 2 раза уменьшается глубина слоя с изменённой микроструктурой и твёрдостью.

Атмосфера сухого воздуха. Наиболее инертной средой в атмосфере сухого воздуха является прокалённый песок, просушенный графит, применение которых в песочных затворах особенно целесообразно для дисперсионного твердения и отжига высоколегированных сталей и сплавов. Существенный рост оксидной плёнки на поверхности титановых сплавов наблюдается при нагреве в воздушной атмосфере в электропечи : с температуры 650 °С – при выдержке более 1 ч, с температуры 900 °С – при выдержке более 30 мин, при электроконтактном нагреве с температуры 1000 °С – при выдержке более 5 мин (рис. 1). Исследованиями установлено, что электроконтактный нагрев и последующий отжиг в воздушной среде

позволяет получать сложные листовые детали из титановых сплавов с высокими показателями механических свойств, при этом содержание газовых примесей в поверхностном слое находится в пределах допуска по ОСТ 190013-81. Установлены условия использования газолазерного раскроя (ГЛР) в среде технического азота без защиты обратной стороны реза в атмосфере воздуха титановых сплавов. При этом содержание газовых примесей в поверхностном слое образцов после ГЛР соизмеримо с содержанием газовых примесей в основном металле. Показано, что образующийся при ГЛР титановых сплавов град можно использовать для изготовления порошкового материала – нитрида титана.

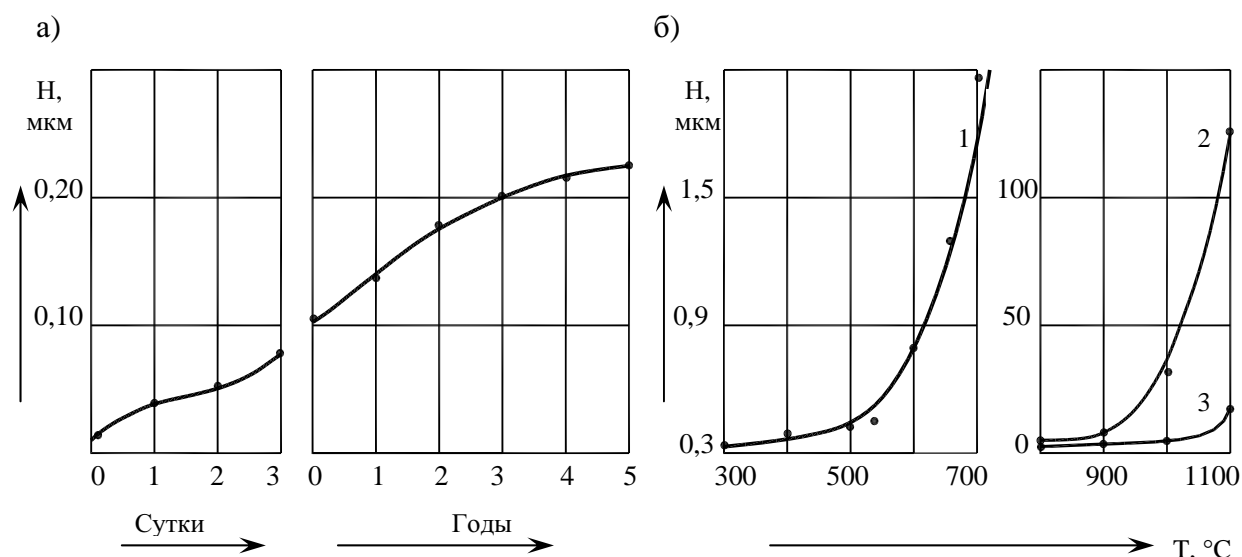


Рис. 1. Рост толщины оксидной плёнки на поверхности титана:

а – при температуре окружающего воздуха 25 °С, б – при выдержке : 1 – 60 мин, 2 – 30 мин, 3 – 5 мин; для соответствующей температуры : 1, 2 – при нагреве в электропечи, 3 – при электроконтактном нагреве

Геттеры (газопоглотители) для создания защитной и насыщающей среды в атмосфере воздуха. Кинетические кривые изменения давления воздуха в изолированном объёме показывают, что нагрев увеличивает давление до определённой величины, соответствующей заданной температуре. Изотермическая выдержка практически не влияет на изменение давления. Добавки титановой стружки (геттеры) приводят к изменению вида кинетических кривых, давление воздуха в изолированном объёме возрастает, а затем начинает падать (рис. 2). На поверхности титановой стружки при температурах 500 – 600 °С образуются следы окисной плёнки, которые при нагреве выше этих температур исчезают. Было установлено, что в бескислородной среде добавка углеродистых материалов для уменьшения количества газов в изолированном объёме не приводит к взаимодействию с поверхностью сталей и сплавов при температурах до 1100 °С и обычной засыпке. При нагреве под термообработку в изолированном контейнере с титановой стружкой деталей из сталей различного класса их окисление не происходит, поверхность образцов получается светлой, блестящей, не требующей очистки, доработки, что позволяет повысить их качество и надёжность. Сравнительные испытания усталостной прочности показали, что образцы из высокопрочной коррозионно-стойкой стали при термической обработке в вакууме имеют усталостную прочность в 1.5...2 раза меньше, чем при термической обработке в контейнере с титановой стружкой (табл. 1).

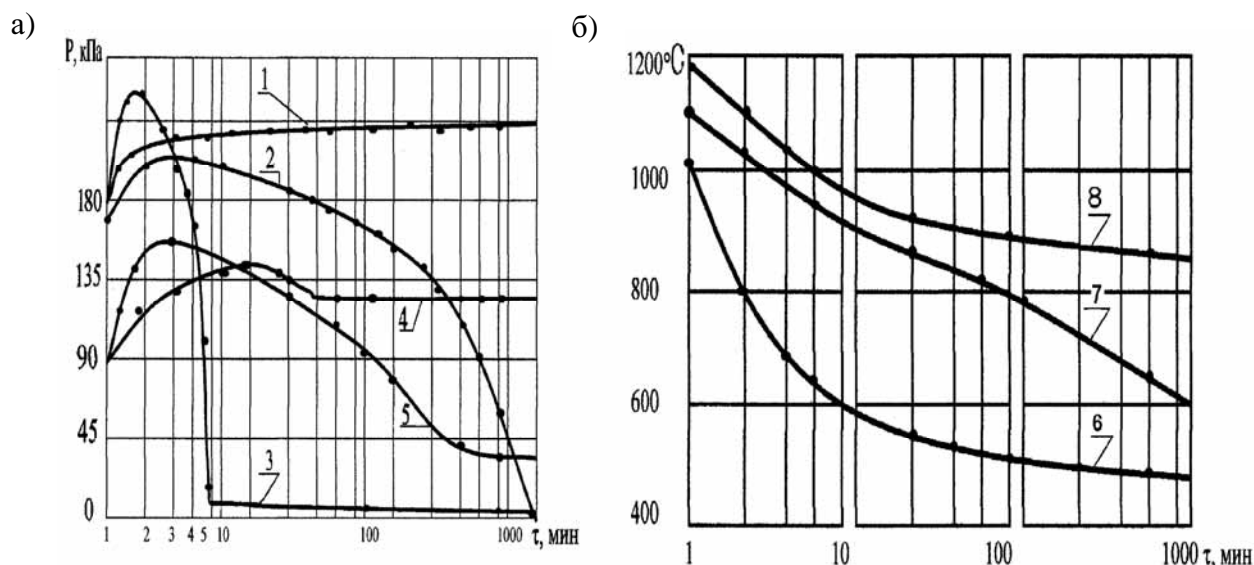


Рис. 2. Кинетические кривые: *а* – изменение давления в изолированном объеме воздуха при различных температурах нагрева титановых образцов из сплава ВТ1: 1 – пустой контейнер, 2 – при $V/S = 0,5$; 3, 4, 5 – при $V/S = 0,05$; 1, 2, 3 – 900 °С; 4 – 450 °С; 5 – 700 °С; *б* – изменение границ: существования окисной (6), и нитридной (7) пленок; начала вакуумного травления (8) при соотношении $V/S = 0,05$

Таблица 1

Изменение прочности и малоциклового усталости коррозионно-стойких сталей в зависимости от режима закалки, среды нагрева под закалку и вида механической обработки после закалки

| Среда нагрева и выдержка, мин | Глубина дефектного слоя, мм | σ_B , МПа | | Число циклов до разрушения при $\sigma_{\alpha}^{sp} = (0,7\sigma_B - 0,2\sigma_B)/2$ | |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------|-------------|---|-------------------|
| | | 13X15H4AM3 | 08X15H5Д2Т | 13X15H4AM3 | 08X15H5Д2Т |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Соляная ванна, 60 | 0,35 | 1360... 1370 | — | 12 400... 16500 | — |
| | | 1365 | — | 18 939 | — |
| | Отсутствует* | 1400...1420 | — | 24 590...32 650 | — |
| | | 1410 | — | 35 190 | — |
| Вакуум, 60 | 0,20 | 1270...1370 | — | 25 300...32 650 | — |
| | | 1350 | — | 29 296 | — |
| | Отсутствует* | 1430...1450 | — | 44 820...67 620 | — |
| | | 1440 | — | 54 970 | — |
| Вакуум, 45 | 0,10 | 1420...1440 | 1270...1300 | 11 000... 15000 | 36 280...41 300 |
| | | 1430 | 1290 | 12 980 | 37 954 |
| | Отсутствует** | 1420...1440 | 1280...1310 | 21 300...25 600 | 69 275...75 980 |
| | | 1430 | 1290 | 23 900 | 73 582 |
| | -0,03*** | 1435...1440 | 1275...1320 | 34 300...39 980 | 138 600...147 200 |
| | | 1440 | 1290 | 38 954 | 144 860 |
| Аргон, 60 | 0,12 | 1360...1380 | — | 20 720...25 430 | — |
| | | 1370 | — | 23 575 | — |
| | Отсутствует* | 1400...1400 | — | 27 200...38 950 | — |
| | | 1400 | — | 36 650 | — |
| Эмаль, 60 | 0,05 | 1390...1440 | — | 30 380...64 300 | — |
| | | 1420 | — | 48 270 | — |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| | Отсутствует* | $\frac{1440...1400}{1440}$ | — | $\frac{63\ 690...69\ 670}{65\ 740}$ | — |
| Эмаль, 45 | Отсутствует*** | $\frac{1490...1520}{1500}$ | $\frac{1290...1320}{1300}$ | $\frac{77\ 000...123\ 100}{92\ 420}$ | $\frac{265\ 350...290\ 480}{280\ 920}$ |
| Изолированный объем воздуха, 60 | 0.03 | $\frac{1410...1450}{1430}$ | — | $\frac{41\ 560...60\ 870}{54\ 280}$ | $\frac{98\ 352...112\ 300}{103\ 330}$ |
| | Отсутствует* | $\frac{1430...1440}{1440}$ | — | $\frac{61\ 270...70\ 320}{8\ 430}$ | $\frac{156\ 800...174\ 200}{166\ 230}$ |

*Удаление дефектного слоя проточкой, ** то же шлифованием; *** то же опескоструиванием.

Примечания. 1. В числителе приведены минимальные и максимальные значения, а в знаменателе – среднее значение (из 7 образцов).

2. σ_{α}^{cp} – амплитуда напряжений при усталостных испытаниях.

Использование псевдооживленного слоя сыпучих материалов. Исследованиями было установлено, что одним из перспективных направлений существенного упрочнения и создания новой поверхностной структурной неоднородности деталей из сплавов и сталей является интенсификация процессов нагрева под штамповку и термообработку в печах и установках с псевдооживленным (кипящим) слоем различных сыпучих материалов.

Исследования внесли весомый вклад в теорию и практику интенсификации процессов нагрева, охлаждения, диффузионного взаимодействия со средой заготовок из различных конструкционных материалов. Интенсивность нагрева заготовок в таком слое не уступает интенсивности нагрева в расплавах солей и соизмерима с нагревом токами высокой частоты. Процесс охлаждения в нем по интенсивности не уступает охлаждению в масле, и при этом исключаются вредные для воды, масла и даже жидкого азота процессы пленочного кипения и образования паровой рубашки на поверхности деталей при охлаждении.

Впервые показана интенсификация более чем на порядок скорости диффузионного легирования поверхности металлов из твердой фазы под воздействием электрического тока в инертной среде и вакууме (цементация, цианирование, азотирование, борирование, комплексное легирование и др.).

Проведение этих исследований позволило в кратчайшие сроки внедрить процессы цианирования и азотирования винтовой пары для ЛА с изменяющейся стреловидностью крыла и борирования титанового лыжонка в фильтрующемся слое на традиционном оборудовании.

Диффузионная металлизация в псевдооживленном слое углеграфитовых материалов позволяет интенсифицировать процессы насыщения по сравнению с неподвижным слоем в 2-3 раза и приблизить его к интенсивности насыщения из расплавов солей. Псевдооживление позволяет увеличить количество инертной добавки без существенного снижения интенсивности процесса, исключает спекание насыщающей среды и припекание ее к поверхности насыщаемых изделий и исключает трудоемкие операции загрузки и выгрузки изделий. Скорость разогрева насыщающей среды в вибропсевдооживленном слое при обычных условиях в 5, а в вакууме в 4 раза быстрее, чем в неподвижном слое. Использование инертных газов азота или аргона позволяет загружать изделия непосредственно в разогретую печь и осуществлять непрерывный цикл обработки без ее охлаждения.

Этот метод позволяет существенно повышать градиент химического потенциала насыщающего элемента за счет как каталитического воздействия добавок катализаторов, так и за счет образования промежуточных высокореактивных соединений радикалов непосредственно на поверхности обрабатываемых деталей и интенсифицировать диффузионные процессы.



Борирование повышает абразивный износ титановых сплавов в 10 раз, по сравнению с исходным состоянием. Борирование, алитирование и силицирование повышает окислительную стойкость титановых сплавов в 10, 6 и 4 раза, а бороалитирование в 20 раз, по сравнению с образцами без покрытия. Борирование, силицирование и хромирование улучшают, а алитирование, боро- и хромоалитирование ухудшают кислотостойкость титановых сплавов. Борирование, бороалитирование, хромирование и титанирование улучшают, а силицирование и алитирование ухудшают кислотостойкость нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Максимальной термостойкостью, более чем на порядок, обладают образцы молибдена после титаносилицирования по сравнению с исходным состоянием.

Создание объемного упорядочения структурной неоднородности конструкционных материалов в процессе фазовых превращений [3]

Традиционные технологические методы повышения прочности, основанные на увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности, приводят к снижению пластичности, вязкости и, тем самым, надежности изделий.

При наличии критической концентрации плотности дислокаций в силу неравномерного распределения структурных дефектов отдельные объемы металла и сплава пересыщаются дислокациями. Это вызывает нарушение сплошности в виде субмикроскопических трещин и снижение прочности. Последующий отпуск приводит к уменьшению прочности на 20...30 %, а пластичность возрастает, причем, чем выше температура отпуска, тем меньше предел прочности и выше пластичность.

Существуют и исключения из общих закономерностей, когда под влиянием технологических приемов одновременно увеличиваются и прочность, и пластичность.

По результатам работ в этой области опубликовано 159 научных трудов, сделано 14 докладов на международных конференциях, приоритет и новизна исследований подтверждена 44 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Исследования влияния режимов закалки стали марки 30ХГСА на механические свойства показали, что после закалки образцов $\varnothing 10$ мм с 890 ± 110 °С в масле $\sigma_b = 1600 \dots 1800$ МПа, $\delta = 1 \dots 2$ %; последующего отпуска при $480 \dots 530$ °С, 1 ч $\sigma_b = 1100 \dots 1300$ МПа, $\delta = 8 \dots 12$ %; изотермической закалки в щелочи при 380 ± 10 °С, 20 мин $\sigma_b = 1450 \dots 1600$ МПа, $\delta = 14 \dots 18$ %. Проведёнными исследованиями [3] изотермической закалки, как инструмента нанотормирования дефектной структуры стали марки Р18, был разработан оптимальный режим, включающий (в зависимости от химического состава стали) температуру нагрева под закалку 1280 – 1290 °С, температуру изотермической выдержки 280 – 320 °С и время выдержки, исключающее бейнитное превращение, что позволяет выравнивать плотность дефектов на низких структурных уровнях и в результате комплексно улучшить характеристики материала: предел прочности – на 45 %, красностойкость – на 10 % при одновременном увеличении пластичности, износостойкость – на 66 %.

Особое состояние фазового предпревращения характеризуется наименьшей устойчивостью атомов для обеих фаз. Тепловое воздействие на металл и сплав в интервале температур предпревращения приводит к максимальной диффузионной подвижности атомов. В этих условиях протекают многоуровневые релаксационные процессы, которые фиксируются при последующем охлаждении и обеспечивают повышенную прочность и пластичность заготовок и их высокую стабильность. Исследованием влияния температуры окончательной штамповки на механические свойства заготовки из сплава марки ВТ20 одной и той же плавки с температурой полиморфного превращения $T = 975$ °С после предварительной двухступенчатой штамповки подвергались окончательной третьей штамповке после нагрева их до температуры полиморфного предпревращения и охлаждению на воздухе с последующим отжигом при температуре 960 °С, в течение 1 ч. Установлено, что деформация в температурном интервале существования α -фазы, близкой к температуре полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \beta$ приводит к образованию структуры (рис. 3, б), связанной с процессами рекристаллизации,

коагуляции и глобуляризации, что позволяет повысить предел прочности на 8...10 %, а характеристики пластичности в 1.5...2 раза, уменьшить анизотропию свойств штамповок в зависимости от направления испытаний и улучшить качество деталей.



Рис. 3. Микроструктура образцов заготовок при различной температуре окончательной штамповки: а – 1100 °С; б – 970 °С; в – 920 °С

Исследование электроконтактного нагрева заготовок из сплава марки ВТ20 до температур полиморфного «предпревращения» $\alpha \rightarrow \beta$ и последующего охлаждения в штампе позволило одновременно увеличить прочность и пластичность, при этом σ_B повысилась на 15 %; $\sigma_{0,2}$ – на 13 %; δ – на 45 %, угол загиба – на 25 %; малоцикловая усталость – на 23 %, по сравнению с традиционными способами упрочнения; и существенно снизить содержание газовых примесей (H_2 , O_2 , N_2). Максимум пластичности на образцах из сплава ВТ20 достигается при введении удельной энергии ЭИВ $q = 2...4$ Дж/мм³, что соответствует разогреву заготовки до температур 220...540 °С. Время формообразования детали не превышает 0,8...1,0 с. Механические свойства заготовок, обработанных по такому способу, составляли: $\sigma_B = 1270$ МПа, $\delta = 28$ % (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства сплава ВТ20 после различных видов упрочнения
 в процессе формообразования

| Способ упрочнения | Механические свойства | | | | | Содержание газов | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---|------------------|-------|-------|
| | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Угол, ° | Число циклов до разрушения при $\sigma_{\alpha}^{cp} = (0,75\sigma_B - 0,49\sigma_B)/2$ | H_2 | O_2 | N_2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Исходное состояние, отжиг 650 °С, 1 ч | 1080 | 1030 | 12 | 38 | - | 0.0081 | 0.085 | 0.021 |
| Холодная прокатка | 1130 | 1090 | 7 | 34 | - | - | - | - |
| Холодная прокатка, отжиг 650 °С, 1 ч | 1130 | 1080 | 9 | 36 | - | 0.0085 | 0.098 | 0.020 |
| Холодная прокатка, отжиг 860 °С, 1 ч | 1050 | 980 | 11 | 38 | - | 0.0087 | 0.090 | 0.023 |
| Электроконтактный нагрев 1020 °С, охлаждение в металлической матрице, отжиг 650 °С, 1 ч | <u>1100–1130</u> 1110 | <u>1030–1080</u> 1050 | <u>10–12</u> 11 | <u>36–42</u> 40 | <u>215000–243000</u> 222000 | 0.0112 | 0.117 | 0.039 |
| Электроконтактный нагрев 960 °С, охлаждение в металлической матрице | 1260 | 1210 | 18 | 44 | ... | 0.0096 | 0.093 | 0.029 |

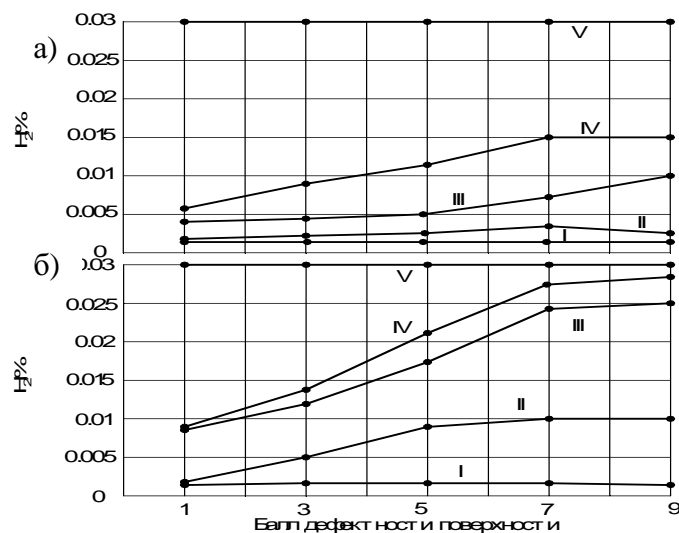
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------|-------|-------|
| Электроконтактный нагрев 960 °С, охлаждение в металлической матрице, отжиг 650 °С, 1 ч | $\frac{1240-1270}{1250}$ | $\frac{1180-1210}{1190}$ | $\frac{14-18}{16}$ | $\frac{44-48}{46}$ | $\frac{237000-263000}{255000}$ | 0.0096 | 0.093 | 0.029 |
| Электроимпульсное воздействие с введением удельной электрической энергии $q = 1,7$ Дж/мм ³ | $\frac{1250...1280}{1270}$ | $\frac{1180...1220}{1200}$ | $\frac{24...30}{28}$ | $\frac{48...52}{50}$ | $\frac{268000...296000}{282000}$ | 0.0078 | 0.089 | 0.019 |
| Требования для сплава ВТ20 по ГОСТ 90218-76 | 1000...1200 | ... | 9 | 30 | ... | - | - | - |

Примечание. В числителе – максимальные и минимальные значения, в знаменателе – среднее значение семи испытанных образцов.

Управление упорядочением структурной неоднородности металла шва сварных конструкций из титановых сплавов [3]

По результатам систематических исследований существующих и новых процессов сварки плавлением титановых конструкций и сварки трением конструкций из алюминиевых сплавов опубликовано 123 научных труда, сделано 23 научных доклада на международных конференциях, приоритет и новизна исследований подтверждена 27 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения, одним свидетельством по заявке №А-93 от 08.01.1998 на научную идею «О самопроизвольном сжатии дугового разряда» регистрационный № 93 от 11.05.1998 г. приоритет от 30.05.1996.

Конструкции из листовых заготовок. Разработана концепция управления процессом термического цикла сварки (ТЦС) титановых сплавов для создания металла шва с заданными свойствами путем установления связей между их составом, технологий и свойствами. Для оценки эффективности процесса ТЦС титановых сплавов предложено использовать (величину) насыщенность капиллярно-конденсированной влагой поверхности стыкуемых заготовок и присадочной проволоки, позволяющую учитывать порообразование в металле шва и скорость охлаждения в интервале температур полиморфного превращения, определяющую структуру и свойства металла шва. При этом установлена взаимосвязь между конденсированной влагой и содержанием водорода в поверхностном слое титановых заготовок, позволяющая четко разделить поверхностно-адсорбированную влагу и капиллярно-конденсированную в зависимости от качества поверхности стыкуемых заготовок и присадочной проволоки (рис. 4).



Содержание водорода : I – в основном металле, II – после обезжиривания в спирте исходной поверхности, III – исходная поверхность после механической обработки, IV – после охлаждения до -10 °С и выдержки на воздухе при комнатной температуре 2 ч, V – сразу после охлаждения до -10 °С

Рис. 4. Изменение содержания водорода в поверхностном слое заготовок из титановых сплавов ВТ1-00 (а) и ВТ20 (б) в зависимости от балла дефектности, вызванного различными методами обработки, условиями хранения и последующей обработки.

1 – чистовое шлифование; 3 – шабрение; 5 – чистовое фрезерование; 7 – грубое фрезерование; 9 – рубка на ножницах гильотинного типа

Сравнительными исследованиями механических свойств основного металла и металла шва листовых заготовок различных толщин и плавок по результатам входного и технологического контроля конкретных деталей ЛА за пятилетний период было установлено, что для толщин 1,2 мм и 2,0 мм независимо от химического состава свойства металла шва и основного металла практически не различаются, а для толщин 2,5 мм и 3,0 мм независимо от химического состава свойства металла шва ниже свойств основного металла и в некоторых случаях более чем на 10 – 15 %. Изменение режимов ТЦС на «жесткие» для этих толщин привело к увеличению временного сопротивления разрыву металла шва по сравнению с основным металлом более чем на 15 % и незначительному уменьшению угла загиба. Из проведенных исследований следует, что механические свойства металла шва титановых сплавов определяются процессами ТЦС (рис. 5).

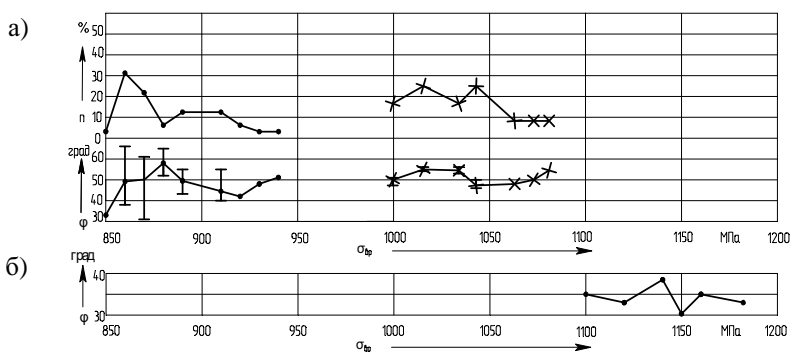


Рис. 5. Изменение механических свойств основного металла (-x-x-x) и сварного шва (-••-) образцов из листа $\delta = 2,5$ мм сплава марки ВТ20 в зависимости от режима ТЦС:
 а – традиционные режимы сварки; б – «жесткий» режим сварки

Установлено, что температурное поле, достаточное для удаления капиллярно-конденсированной влаги с поверхности заготовок, находится в диффузионной зоне соединения, где происходит полное смятие выступов шероховатости микронадрывов и образование замкнутых полостей, заполненных влагой. Регулярное чередование выступов на поверхности титановых заготовок, образованных ГЛР, и их высокая твердость, практически сохраняющаяся до температуры плавления, позволяют полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу с поверхности заготовки, полученной раскроем на ножницах гильотинного типа, и получить металл шва высокой плотности без пор. В последнем случае поры образуются в случае использования некачественной присадочной проволоки.

Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что улучшение свойств металла шва титановых сплавов определяется процессами ТЦС, а именно процессами превращения при охлаждении из расплавленного состояния за счет получения мелкозернистой структуры и изменения толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения, что позволяет, назначая режимы ТЦС, прогнозировать свойства титановых конструкций (рис. 6).

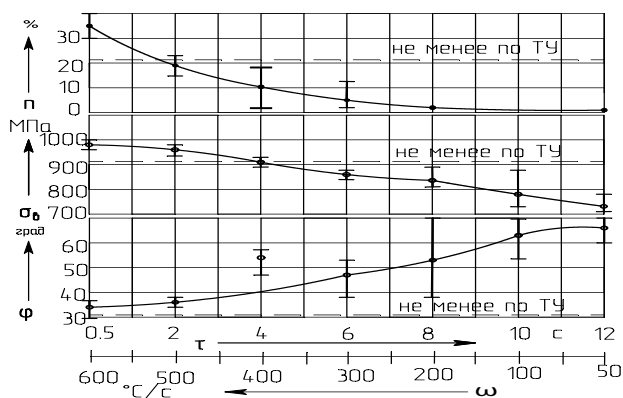


Рис. 6. Изменение механических свойств сварных образцов из титанового сплава ВТ20 и количества пор на 100 мм сварного шва в зависимости от времени существования расплава сварочной ванны и скорости охлаждения в интервале полиморфного β - α -превращения

Исследования механических свойств при статических, повторно-статических и виброиспытаниях титановых конструкций показали, что конструкции, изготовленные при применении оптимальных режимов ТЭС и термообработки, не уступают конструкциям, изготовленным по традиционной технологии из цельного металла.

Конструкции из плит и штамповок. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана и внедрена в производство усовершенствованная технология сварки, позволяющая получать за один проход соединения толщиной до 54 мм и до 76 мм при двусторонней сварке, что в полтора раза превышает базовые показатели; более полная реализация предлагаемых технологических решений позволит достичь прогнозируемого результата в 60 мм и 100...110 мм соответственно.

При разработке простой и надежной конструкции электрода с повышенной проплавляющей способностью исходили, во-первых, из того факта, что электрическая сварочная дуга является, по существу, проводником, по которому течет ток. Во-вторых, учитывалась возможность обязательного увеличения рабочей (скругленной) поверхности электрода в случае необходимости повышения сварочного тока. Если исходить из принципа равенства площадей скругленной рабочей поверхности электрода и поверхности, занимаемой катодным пятном, то можно сохранять высокую стойкость электрода при увеличении силы сварочного тока путем увеличения площади рабочей поверхности. Наиболее благоприятной, с этой точки зрения, является тороидальная заточка рабочего торца электрода.

Дуга, горящая с тороидального электрода, имеет форму полого цилиндра – полоцилиндрическая дуга. Поперечное сечение такой дуги будет иметь форму кольца (рис. 7, а). Эту дугу можно смоделировать в виде множества параллельных токов, суммарное электромагнитное взаимодействие которых должно приводить к ее контрагированию в результате эффекта самофокусирования (рис. 7, б).

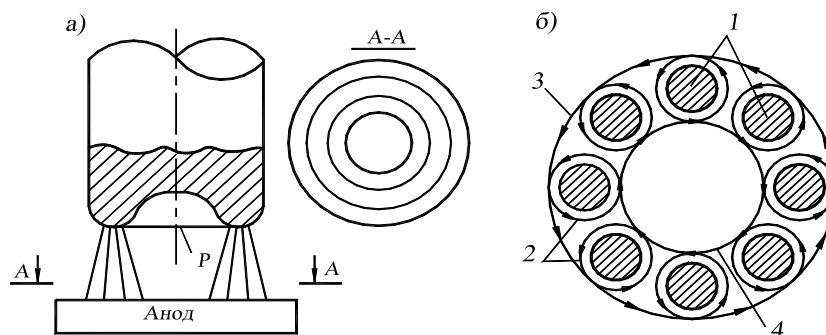


Рис. 7. Тороидальный электрод с полоцилиндрической дугой (а); схема, поясняющая возникновение эффекта сжатия кольцевой сварочной дуги (б): 1 – проводники; 2 – магнитные поля проводников; 3 – внешнее суммарное магнитное поле; 4 – внутреннее суммарное магнитное поле

Механизм самофокусирования объясняется следующим. Во-первых, плазменные стенки полоцилиндрической дуги должны сжиматься в результате суммарного взаимодействия внешнего и внутреннего магнитных полей, направленных в противоположные стороны (рис. 7, а). Во-вторых, суммарное взаимодействие параллельных токов должно привести к сжатию (самофокусированию) всей полоцилиндрической дуги (рис. 7, б).

Такая конструкция, получившая название «тороидальный электрод», выгодно отличается от других конструкций простотой исполнения и высокой динамичностью основных характеристик: при неизменном диаметре электрода площадь его рабочей поверхности можно изменять в широких пределах путем изменения диаметра центральной лунки (рис. 8). При

этом появляется возможность в значительной степени увеличить сварочный ток и достичь значительной глубины проплавления.

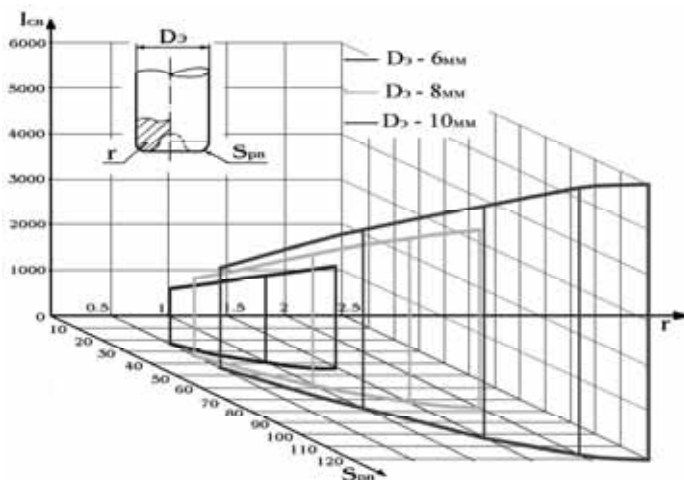


Рис. 8. Изменение площади рабочей поверхности (S_n) и расчетной силы сварочного тока ($I_{св}$) в зависимости от радиуса тора

Установлено, что оптимальной формой кромки для формирования металла шва является кромка, образованная гидроабразивной резкой и плазменной резкой. Изменение поверхностного слоя сформированной кромки составляет 0,5...1,0 мм для гидроабразивной резки и 1,5...2,0 мм — при плазменной, что при соблюдении коэффициента фугитивности $K = 35,64 \cdot 10^4$ кДж/м² позволяет получать качественную форму металла шва с высокими показателями его механических свойств за счёт эффекта саморафинирования, что позволяет использовать его для изготовления ответственных титановых конструкций. Газокислородная резка обеспечивает высокие механические показатели металла шва, но из-за грубого рельефа кромок после сварки в металле шва наблюдается значительная усадка, что позволяет использовать этот способ только для изготовления оснастки.

Сравнительными исследованиями металла шва, полученного электрической дугой и электронным лучом, всех толщин, вплоть до максимальной, установлено, что величины механических свойств не выходят за пределы требований, предъявляемых к высоконагруженным титановым конструкциям. При формировании металла шва электрической дугой временное сопротивление разрыву несколько меньше, а ударная вязкость выше, в сравнении с металлом шва, сформированного электронным лучом. Малоцикловая усталость практически мало различается. Различия в значениях механических свойств вызваны изменениями в структуре металла шва из-за разной скорости охлаждения при кристаллизации, что позволяет улучшать механические свойства путем изменения скорости кристаллизации металла шва, это подтверждается электронно-микроскопическими исследованиями микроструктуры металла шва.

Исследованиями химического состава и примесей газов установлено, что распределение газов N_2 , O_2 , H_2 как при сварке СПВЭ, так и ЭЛС находятся в пределах допуска для соединений ответственного назначения и составляют: для кислорода — 0,043 – 0,079 %, для азота — 0,019 – 0,034 %, для водорода — 0,0027 – 0,0088 %, а для основного металла: кислород — 0,064 %, азот — 0,026 %, водород — 0,0054 %. Закономерности распределения примеси H_2 удовлетворительно согласуются с данными С.М. Гуревича, а именно: в металле шва содержание H_2 ниже, чем в основном металле.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) [5]. Установлена возможность СТП конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов на примере сплава марки В95. Апробирован метод моделирования процесса получения сварного соединения на пластилиновой модели. Определены максимальная температура и характер ее распределения как в образце, так и рабочем инструменте при СТП алюминиевого сплава В95.

По результатам механических испытаний видно, что сварные соединения после СТП имеют прочность в 1,89 – 2,75 раза ниже, чем основной металл. После закалки и естественного старения значения механических свойств идентичны основному металлу (табл. 3).

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов из сплава В95

| Номер образца | Предел прочности σ_b , МПа | | |
|---------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|
| | Основной металл | После СТП | После СТП, закалки и старения |
| 1 | 539,0 | 274,4 | 547 |
| 2 | 539,0 | 284,2 | 535 |
| 3 | 539,0 | 296,0 | 503 |
| 4 | 509,6 | 245,0 | 522 |
| 5 | 542,0 | 245,8 | 554 |

Исследованиями макро- и микроструктуры металла шва, выполненного СТП, установлено, что во всей зоне соединения с основным металлом отсутствуют дефекты в виде трещин и пор (рис. 9). Структура металла шва однородная, мелкозернистая, резко отличающаяся от структуры основного металла. Относительно оси симметрии поперечного сечения сварного соединения наблюдается различие в ширине переходной зоны от сварного шва к основному металлу. Относительно направления движения РИ при вращении его по часовой стрелке минимальная ширина переходной зоны расположена слева.

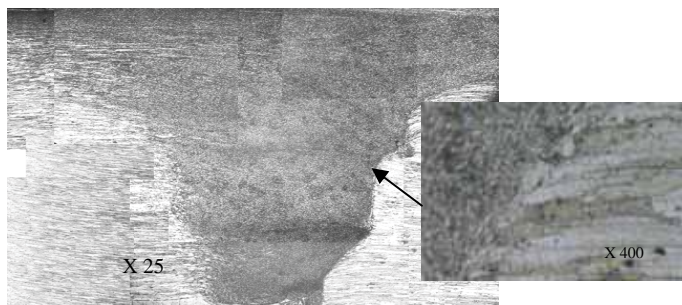


Рис. 9. Макро- и микроструктура поперечного сечения сварного шва, выполненного СТП.

СТП с последующей термической обработкой позволяет получать сварные соединения из алюминиевого сплава марки В95 прочностью, близкой основному металлу, что дает возможность изготавливать панели с коэффициентом использования металла 0,89 – 0,92 вместо 0,07 – 0,20 (при фрезеровании плит).

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин, А. Г. Современные технологии авиастроения / А.Г. Братухин, Б.И. Долотов, В.И. Муравьев [и др.]; под ред. А.Г. Братухина. Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
2. Муравьев, В. И. Изготовление литых заготовок в авиастроении / В.И.Муравьев, В.И.Якимов, А.А.Евстигнеев [и др.]; под ред. В.И. Муравьева – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 616 с.
3. Муравьев В.И., Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, Б.И. Долотов [и др.]; под ред. В.И. Муравьева. – Москва: «Эком», 2009. – 752 с.
4. Муравьев, В. И. Изотермическая закалка как инструмент наноформирования дефектной структуры стали Р18 для улучшения эксплуатационных характеристик режущего инструмента. / В.И.Муравьев, А.В.Фролов, А.М.Злыгостев [и др.] // Металлообработка. – 2009. – № 2. – С. 50-57.
5. Бахматов, П. В. Исследование параметров сварки трением с перемешиванием высокопрочного алюминиевого сплава В95Т2 / П.В. Бахматов, В.И. Муравьев, К.А. Мелкоступов // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 17-19.