На правах рукописи

СМИРНОВ Сергей Вячеславович

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6С ПРИ СКОРОСТНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ И ДЕФОРМАЦИИ

Специальность 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский политех)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Егорова Юлия Борисовна**
доктор технических наук, профессор
Ступинский филиал ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет),
заместитель директора по учебной работе, профессор кафедры «Моделирование систем и информационные технологии», г. Ступино.

Пикалов Сергей Владимирович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
доцент кафедры «Технологии материалов и транспорта», г. Курск.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)» г. Москва.

Защита состоится «24» декабря 2021 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.435.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94 и на сайте http://www.swsu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент А.Ю. Алтухов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время титановые сплавы нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения. Титановые сплавы, обладая высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью, уже сейчас в ряде отраслей промышленности конкурируют с лучшими марками сталей. Современная технология и опыт промышленного производства имеют в своем арсенале большой выбор разнообразных приемов, позволяющих в значительной мере управлять структурой и свойствами сплавов титана.

Тем не менее, большинство двухфазных титановых сплавов до настоящего времени используется в отожженном состоянии, далеко не полностью исчерпав резерв прочности. Имеется ряд деталей, условия работы которых требуют одновременного повышения сопротивляемости высоким механическим и ударным нагрузкам. К таким деталям относятся игольчатые втулки фиксации узлов из композиционных материалов в конструкциях.

Игольчатые втулки получают методом литья в металлические формы (кокили) из титанового сплава ВТ6С. Упомянутый технологический процесс характеризуется высоким уровнем брака из-за возникновения дефектов в виде пор, рыхлоты и трещин в теле иголок диаметром 2–3 мм. Наличие внутренних дефектов в теле игл литых игольчатых втулок приводит к их разрушению как в процессе запрессовки иголок в композиционный материал, так и в процессе эксплуатации конструкции.

В силу отмеченного актуальной становится замена литья на процесс деформирования с высоким нагревом конусного выступа с последующей приваркой иголок к тарелке втулки. Для этого требуется провести комплекс металлофизических исследований с соответствующими технологическими операциями для повышения механических свойств изделия.

Степень разработанности темы. В связи с актуальностью темы общие аспекты взаимосвязи структуры и свойств обстоятельно рассмотрены в многочисленных отечественных и зарубежных работах. А.А. Ильин и И.С. Полькин исследовали возможности управления структурой титановых сплавов. Большой вклад в решение проблемы термической обработки и горячего формообразования двухфазных титановых сплавов внесли Колачев Б.А., Ливанов В.А., Ильин А.А., Буханова А.А., Глазунов С.Г., Скворцова С.В., Коллеров М.Ю., Коммель Л.А., Троицкий О.А., Столяров В.В., Рощупкин А.М., Okazaki K., Kagava M., Conrad H. и др.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является изучение особенности формирования структуры и свойств титанового сплава ВТ6С при высокоскоростном импульсном нагреве электрическим током и деформации, а также разработка на основе полученных результатов технологии изготовления игольчатых втулок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Оценить влияние режимов нагрева на структуру, фазовый состав и механические характеристики титанового сплава ВТ6С;

2. Обосновать выбор комплекса параметров режима формообразования листовой заготовки с импульсным нагревом электрическим током;

3. Изучить влияние амплитудного значения тока в импульсе, скорости деформации и скорости охлаждения на структуру металла в зоне деформированного выступа;

4. Определить влияние параметров импульсного нагрева электрическим током на образование альфированного слоя на поверхности деформированного выступа;

5. Разработать технологическую оснастку для формообразования игольчатой втулки из листовой заготовки;

6. Определить прочностные характеристики соединений иголки с платиной и исследовать влияние термической обработки на механические свойства полученных соединений.

Научная новизна работы:

1. Установлены закономерности влияния импульсного нагрева электрическим током на размер зерна в структуре сплава ВТ6С. Показано, что при импульсном нагреве электрическим током до 1020–1050 °С в течение 0,2–0,8 с размер зерна в структуре сплава ВТ6С составляет 35–80 мкм, в то время как при печном нагреве размер зерна составляет 320–380 мкм.

2. Получены новые данные по механизму формирования структуры сплава ВТ6С при деформировании из β-области, заключающиеся в зарождении α-фазы на границах первичных β-зерен при снижении температуры ниже температуры полиморфного превращения с последующим выделением α-фазы внутри зерен по мере снижения температуры. В связи с более ранним образованием приграничная α-фаза претерпевает большую деформацию при температурах α+β-области. Кроме того, в приграничных участках β-зерен раньше начинается рекристаллизация, приводящая к образованию α-частиц сферической формы.

3. Установлено пороговое значение скорости охлаждения сплава ВТ6С после скоростного импульсного нагрева электрическим током до β-области и последующего деформирования составляющее не менее 63–65 °С/с, обеспечивающее образование структур мартенситного типа.

Теоретическая и практическая значимость

На основании полученных результатов исследований разработана производственная инструкция и комплект технологической оснастки по изготовлению игольчатого крепежа. Изготовлены партии игольчатых втулок и одностороннего игольчатого крепежа, которые использованы для крепления узлов из углепластика в конструкции летательных аппаратов.

Результаты исследований включены в учебный процесс при преподавании дисциплины «Технологии конструкционных материалов» в ФГАОУ ВО «Московский Политех», а также при руководстве научной работой бакалавров и магистрантов.

Методология и методы исследования

В работе использовались современные экспериментальные методы исследования строения и физико-механических свойств материалов со статистической обработкой полученных экспериментальных результатов. Микроструктурный анализ выполнялся на оптических микроскопах “Neofot-32”, Carl Zeiss Axio Observer, растровом электронном микроскопе SEM 515 «Philips» и просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125.На поверхности и в поперечном сечении образцов определялась твердость и микротвердость материала на приборах Виккерса, ПМТ-3, “Nano Hardness Tester” NHT-S-AX-000X.

Экспериментальные исследования проводились на машине контактной точечной сварки МТВ-7501. Определение разрушающего усилия неразъемных соединений иголок с тарелкой втулки проводилось на специальном стенде при нагружении иголок статическим и динамическим усилием.

Положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность результатов исследований влияния параметров скоростного импульсного нагрева электрическим током с последующим деформированием в нагретом состоянии листовой заготовки из титанового сплава ВТ6С на ее структуру и механические свойства.

2. Рациональный диапазон параметров режима деформирования конического выступа в листовой заготовке с нагревом импульсом электрического тока до температуры 980–1050 °С, которая обеспечивается при величине тока импульса в пределах 4,2–5,3 кА с длительностью 0,28–0,35 с и с последующим деформированием за счет сжатия электродов со скоростью 38–50 мм/с.

3. Закономерности влияния параметров структуры, включающих в себя морфологические, ориентационные и геометрические показатели на комплекс механических свойств сплава ВТ6С.

Достоверность основных положений и научных выводов обеспечивается большим экспериментальным материалом, полученным с использованием современной аппаратуры, надежных и независимых методов исследования, включающих электронную и оптическую микроскопию, математической обработкой результатов экспериментов, воспроизводимостью и согласованием результатов с данными других исследований, полученными при сопоставимых условиях.

Личный вклад автора в работу. Все изложенные в диссертации результаты исследований получены при непосредственном участии автора. Автору принадлежат идеи в определении цели, анализа и интерпретации результатов, формулировке основных положений и выводов. Большинство экспериментальных исследований выполнено лично автором, под его руководством и при непосредственном участии.

Реализация результатов работы: результаты диссертационной работы внедрены в опытное производство при изготовлении игольчатых

втулок для фиксации деталей из композиционных материалов в авиастроении.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на трех научно-практических конференциях, в том числе: Российская научно-практическая конференция «Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве», Рыбинск, 20-21 сентября 2007 г.; Международная конференция «Молодые ученые – промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию: проблемы и новые решения», Москва, МГИУ, 19-23 ноября 2007 г.; 10-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (МТО-50), 15-16 апреля 2020 года, Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Россия;

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 13 научных работах в том числе в 5 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получены 6 патентов на изобретения и полезные модели.

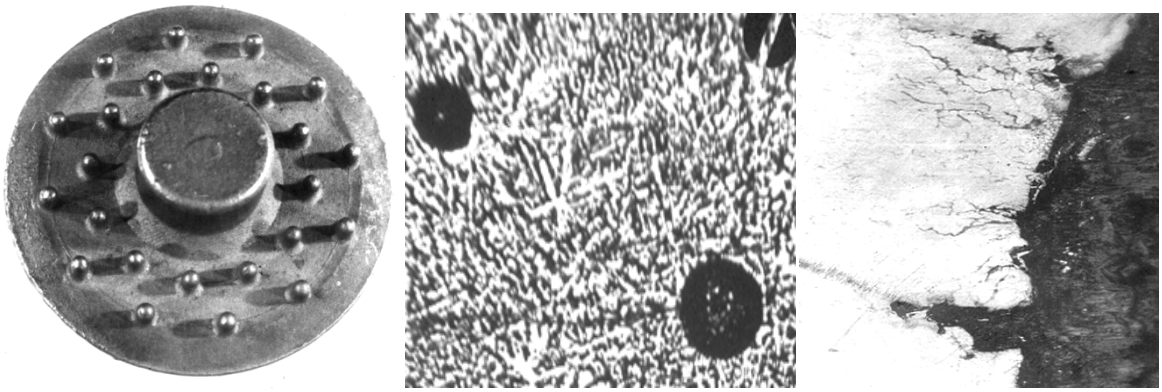
Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (100 наименований), приложения и содержит 182 страницы машинописного текста, в том числе 74 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены направления исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту, представлены апробация работы, публикации и личный вклад автора, описаны структура и объем диссертации.

В первой главе отмечено, что для соединения деталей в конструкциях, включающих композиционные материалы (КМ) применялись в основном: пустотелые заклепки, болты-заклепки и односторонний крепеж. Каждый из видов крепежа обладает недостатками, ограничивающими возможность их использования. Кроме клепки для соединения КМ с металлическими элементами силового каркаса и передачи сосредоточенных усилий применяются болты с игольчатыми втулками, позволяющими передавать рассредоточенную нагрузку с КМ на болт, так называемый «игольчатый крепеж».

Игольчатые втулки, получаемые методом литься в металлические формы (кокили), отличаются высоким уровнем образования дефектов рыхлот, пор и трещин в теле иголок (рисунок 1). Наличие внутренних дефектов в теле игл и напряжений, возникающих при их запрессовывании в композиционный материал приводит к их разрушению в композиционных материале в процессе приложения нагрузки к фиксируемым деталям.



а б в

Рисунки 1 – Литая заготовка игольчатой втулки (*а*), дефекты в виде пор (*б*) и поверхностных трещин (*в*) в теле иглы, (*а*, *б*х150)

В силу отмеченных причин актуальным является разработка и реализация в условиях мелкосерийного производства сварного варианта изготовления игольчатой втулки из листовой заготовки с приваркой иголок методом контактной точечной сварки. Такой вариант изготовления игольчатой втулки (рисунок 2) предусматривает формирование конического выступа в тарелке *1* и последующую приварку иголок *2* к тарелке *1* методом контактной точечной сварки.

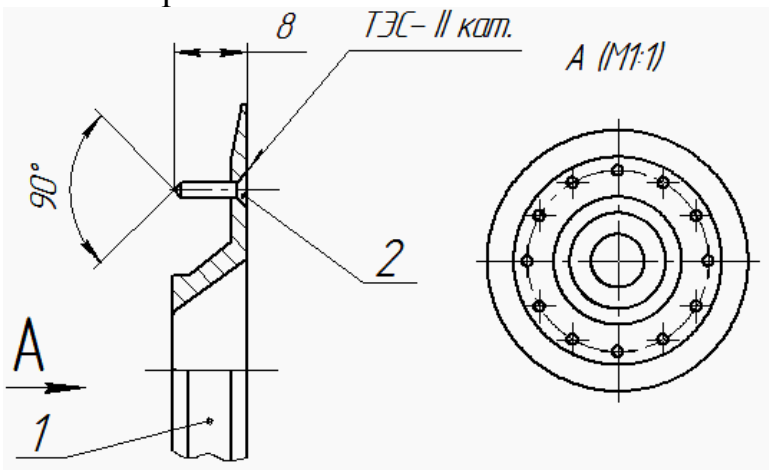


Рисунок 2 – Сварной вариант изготовления игольчатой втулки:
1 – тарелка; *2* – иголка

Формование конического выступа игольчатой втулки осуществляют из листовой заготовки в виде диска и последующего сверления отверстий под иголки, а также токарной обработкой по габаритным размерам.

Проведен анализ принципов легирования титановых сплавов, влияния структурного состояния титановых сплавов на физико-механические свойства и характеристики работоспособности, принципам формирования различных типов структуры деформированных полуфабрикатов.

Показана актуальность проведения исследований и целесообразность применения сплава ВТ6С для изготовления игольчатых втулок.

Во второй главе приведено описание оборудования и методик, применяемых в исследованиях. В качестве материала для изготовления чашки игольчатой втулки использовались заготовки из листов сплава ВТ6С толщиной 1,5–4 мм в виде дисков диаметром 49 и 60 мм.

Для исследования процесса формообразования конического выступа игольчатой втулки использовалась машина контактной точечной сварки марки МТН–75.01 с током пониженной частоты величиной до 75 кА и длительностью протекания импульса тока до 1 с.

В работе для оценки влияние температуры нагрева на свойства металла конического выступа проводились испытания образцов из сплавов ОТ4-1 и ВТ6С на статическое растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66 как при нормальной, так и при повышенных температурах. Для проведения испытаний применялась электромеханическая напольная машина LFM-300 (Швейцария).

Металлографический и фрактографический анализ изломов образцов после испытаний проводился с помощью оптического микроскопа «Carl Zeiss» при увеличении от x100 до x1000 раз и электронного сканирующего микроскопа «Carl Zeiss» evo 50 с увеличением от 30 до 20000 крат (разрешающая способность 1 нм). С помощью электронного сканирующего микроскопа «Carl Zeiss» evo 50 был выполнен количественный анализ состава оксидных пленок на поверхности конического выступа после его формования.

В третьей главе приведены результаты исследования процесса формообразования конического выступа тарелки игольчатой втулки при импульсном нагреве заготовки электрическим током и с последующим деформированием зоны нагрева заготовки.

Для исследования процесса деформирования листовой заготовки машина для точечной контактной дополнительно оснащается специальным приспособлением, устанавливаемым на ее нижний электрод. Приспособление осуществляет операции фиксации и формообразования листовых заготовок. Оно состоит из матрицы *1*, накидной гайки *3* и пуансона *4*. Заготовка 6 из листового титанового сплава фиксируется в матрице *1*, которая располагается на нижнем *2* электроде сварочной машины. Пуансон *4* при этом закрепляется на верхнем *5* электроде машины. Для защиты нагретого металла заготовки от окисления в матрице *1* выполнены каналы для подачи инертного газа (аргона) во внутреннюю полость матрицы *1*.

В качестве материала для проведения исследований использовались заготовки из листов сплава ВТ6С (6,3 %Al; 4,2 %V; 0,1 %Fe; 0,08 %Si; 0,04 %C; 0,01 %N) толщиной 2,5 мм в отожженном состоянии. Временное сопротивление листов сплава ВТ6С в отожженном состоянии составило 835 МПа при относительном удлинении 11%. Температура полиморфного превращения α→β для данного сплава составила $T_{пп}$ = 950 °С. После отжига структура листа сплава ВТ6С представляет собой глобулярную (α+β)–структуру с размером зерен α-фазы 10–12 мкм и β-фазы 2–4 мкм.

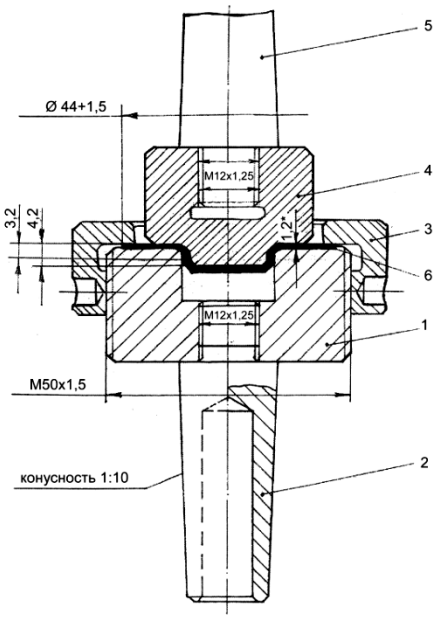


Рисунок 3 – Приспособление для исследования процесса деформирования листовых заготовок титановых сплавов с импульсным нагревом от контактной точечной машины

Микроструктура представляет собой мелкозернистую смесь (α+β)–фаз. При достаточно высоких температурах структура сплава ВТ6С представлена β–фазой, при 800 °С примерно равными количествами α– и β–фаз, а при 550 °С в структуре сплава должно быть всего около 5% β–фазы. Однако равновесие при температурах ниже 600 °С устанавливается очень долго, и поэтому в реальных условиях содержание β–фазы в сплаве ВТ6С в отожженном состоянии составляет около 10%.

Процесс формирования конического выступа игольчатой втулки регламентируется такими параметрами, как температура нагрева заготовки под деформирование, скорость деформирования и величина деформации. Температуру нагрева выбирают на основании ее влияния на механические свойства заготовки, и в первую очередь временное сопротивление и относительное удлинение. Были выполнены испытания на статическое растяжение при повышенной температуре образцов сплава ВТ6С. Установлено, что временное сопротивление уменьшается с увеличением температуры нагрева и достигает величины 75 МПа при температуре нагрева 1050 °С.

Зависимость величины относительного удлинения от температуры нагрева имеет более сложный характер. Если в диапазоне температур от 200 до 400–500° С относительное удлинение практически не изменяется, то с дальнейшим повышением температуры до 940–1050 °С резко увеличивается (примерно в 5 раз) и достигает величины 75–92%.

При печном нагреве с повышением температуры в двухфазной области α-фаза превращается в β-фазу. Увеличение содержания β-фазы при нагреве сопровождается обеднением ее β-легирующими элементами и увеличением межплоскостного расстояния, поскольку атомы ванадия, преимущественно растворяющиеся в β-фазе, имеют меньший атомный радиус, чем атомы титана. В сплаве ВТ6С такое снижение наблюдается в интервале температур

800–850 °С. С повышением температуры закалки до 1000°С твердый раствор данных сплавов обедняется настолько, что после закалки фиксируется α'-мартенсит. В тоже время нагрев в β-область сопровождается интенсивным ростом β-зерен.

При импульсном нагреве заготовок электрическим током из титанового сплава ВТ6С под формирование конического выступа скорость нагрева находится в диапазоне 1715–3220 °С/с. Выдержка при высокой температуре не превышает 0,5 с. В этих условиях практически подавляется процесс обеднения β-фазы легирующими элементами.

Процесс деформирования заготовок начинается сразу после завершения прохождения импульса электрического тока и продолжается на стадии охлаждения заготовки. В зависимости от скорости осадки процесс деформирования конического выступа может проходить в пределах β-области или же распространяться в (α+β)-область. Это может влиять на структуру и свойства материала после деформирования.

Третьим существенным фактором, влияющим на структуру и свойства заготовок сплава ВТ6С после деформирования, является скорость охлаждения материала заготовки. Традиционная закалка сплава ВТ6С включает нагрев до 880–930 °С с последующим охлаждением в воде. В случае деформирования заготовки с нагревом импульсом электрического тока ее охлаждение после деформирования осуществляется за счет теплоотвода в приспособление. В этом случае скорость охлаждения будет находиться в диапазоне 20–35 °С/с, в то время как при охлаждении в воде она будет существенно выше.

Для формирования конического выступа требуемых размеров в условиях импульсного нагрева электрическим током необходимо обеспечить нагрев до температуры порядка 1050 °С области заготовки диаметром 25–30 мм. Для этого выполнена серия экспериментов по определению температуры нагрева заготовки в зависимости от амплитудного значения тока в импульсе $I_и$ и длительности его протекания $t_и$. Для измерения температуры нагрева заготовки применяли сканирующий микропирометр, датчик которого был размещен в специальном канале в нижнем электроде (в матрице рисунок 3). Результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическую формулу, связывающую параметры режима нагрева с конечной температурой:

$$T_к = 2{,}23 \cdot 10^{-6} \cdot I_и^2 \cdot \tau_и,$$

где $T_К$ – конечная температура нагрева заготовки перед деформированием, °С; $I_И$ – сила тока в импульсе, кА; $\tau_и$ – длительность импульса тока, с.

Расчетные данные позволяют отметить, что нагрев листовых заготовок из сплава ВТ6С до требуемых температур перед деформированием будет обеспечиваться при амплитудном значении тока 3,0–5,0 кА при его длительности 0,2–0,5 с. Использование импульсов с амплитудным значением

тока более 10,5 кА сопровождается подплавлением поверхности заготовки в зоне ее контакта с пуансоном (верхним электродом контактной машины).

Таблица 1 – Влияние амплитудного значения тока импульса $I_и$ и длительности его протекания $t_и$ на температуру нагрева заготовки из сплава ВТ6С толщиной 2 мм

Амплитуда импульса тока $I_{имп.}$, кА	Длительность импульса тока τ, с	Температура нагрева Т, °С
1,5	0,3–0,5	200–240
2,5	0,3–0,5	300–360
3,5	0,3–0,5	400–470
4,5	0,3–0,5	600–670
5,5	0,3–0,5	700–760
6,5	0,3–0,5	790–830
7,5	0,3–0,5	840–920
8,5	0,3–0,5	960–990
9,5	0,3–0,5	1020–1080
10,5	0,3–0,5	1250–1370
Примечание: Диаметр зоны нагрева 25–30 мм		

Результаты металлографических исследований показали, что при нагреве до температур 1020–1100 °С с печным нагревом и скоростным нагревом импульсом электрического тока наблюдаются существенные различия в структуре образцов сплава ВТ6С. Нагрев до указанной температуре в печи вызывает интенсивный рост зерна β-фазы до величины 320–380 мкм. При скоростном нагреве импульсом электрического тока интенсивный рост зерен β-фазы тормозиться и при охлаждении фиксируются зерна размером 35–80 мкм.

Влияние импульсного нагрева электрическим током на размер зерна в структуре сплава ВТ6С представлено на рисунке 4.

Результаты проведенных исследований показали, что импульсном нагреве электрическим током не вызывает интенсивного роста размера зерна β-фазы сплава ВТ6С при нагреве выше температуры полиморфного превращения. При температурах на 50–80 °С выше температуры полиморфного превращения размер β-зерен увеличивается незначительно, так как его росту препятствуют примеси в сплаве. Микроструктура сплава ВТ6С после печного и скоростного нагрева импульсом электрического тока приведены на рисунке 5.

На образцах размером 2х10х60 мм были определены механические свойства сплава ВТ6С после печного и импульсного нагрева электрическим током до температуры 1050 °С с охлаждением на воздухе. Временное сопротивление при растяжении при печном нагреве составило 1080 МПа при относительном удлинении 4% и относительном сужении 12%. В случае скоростного импульсного нагрева электрическим током временное

сопротивление составило 1170 МПа при относительном удлинении 18% и относительном сужении 32%.

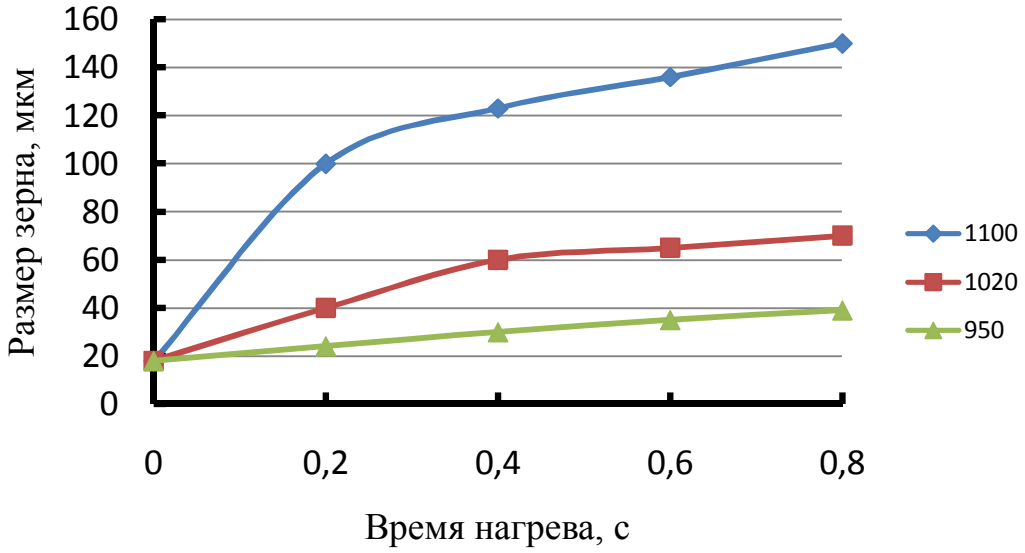
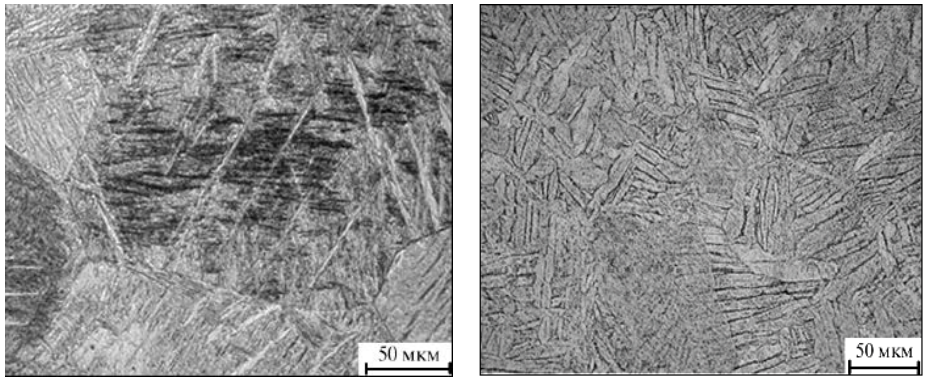


Рисунок 4 – Изменение размера β-зерен сплава ВТ6С при импульсном нагреве электрическим током



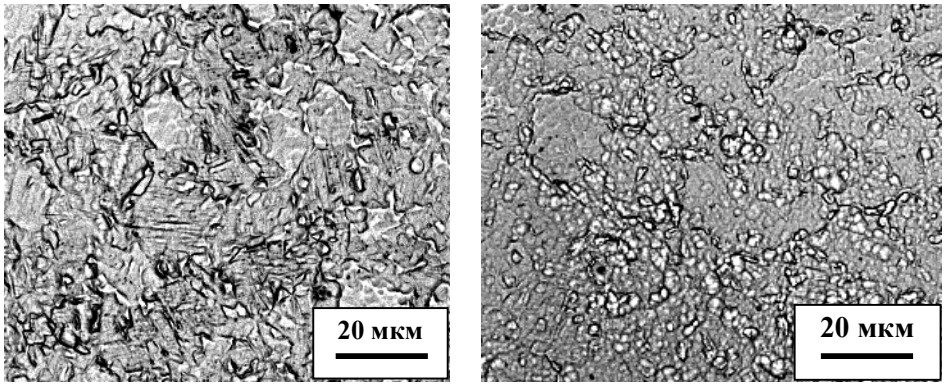
а б

Рисунок 5 – Микроструктуры сплава ВТ6С при печном (а) и высокоскоростном нагреве (б) импульсом электрического тока

При скоростном нагреве импульсом электрического тока деформация заготовки из титанового сплава ВТ6С начинается из β-области и далее протекает по мере охлаждения сплава в α+β-области. Степень деформации при формировании конического выступа не превышает 15%. Сочетание скоростного нагрева импульсом тока и деформации может привести к эффективному измельчению структуры.

Эксперименты показали, что при деформации из β-области наблюдается более заметное измельчение структуры заготовки, чем при деформации, осуществляемой из α+β-области. Это объясняется развитием процесса первичной рекристаллизации в деформированной β-структуре, вызывающей появление новых зерен.

В микроструктуре заготовки из сплава ВТ6С после деформирования на 15% с импульсным нагревом электрическим током до температуры 860–980 °С выявляется мартенсит, размер зерен первичной α-фазы увеличивается до 5–6 мкм, а размер областей мартенсита достигает до 25 и 32 мкм соответственно (рисунок 6, *а*).



а б

Рисунок 6 – Микроструктура сплава ВТ6С после импульсного нагрева электрическим током и деформирования на 15% при скорости деформации 45 мм/с: *а* – нагрев до температуры 940 °С; *б* – нагрев до температуры 1020 °С

Деформация с температуры нагрева 1020 °С приводит к формированию переходной структуры, претерпевшей частичную рекристаллизацию (рисунок 6, *б*). Такая структура характеризуется наличием изогнутых α-пластин с различной степенью сфероидизации и волнистыми межфазными границами, а также значительными различиями в размере и форме α-частиц. В переходной структуре в разной степени могут сохраняться черты пластинчатой структуры – прерывистая α-оторочка по границам первичных β-зерен, α-колонии, пластинчатый характер α-фазы. При этом форма и ориентировка вторичной α-фазы не зависят от формы и ориентировки первичной α-фазы.

Поскольку переходная структура является промежуточным типом от пластинчатой к глобулярной, ее характеризуют одновременно параметрами для глобулярной и пластинчатой структур, а также определяют степень сфероидизации α-пластин.

Исследования тонкой структуры в просвечивающем электронном микроскопе показали, что зерна α-фазы разделены на фрагменты внутри которых наблюдаются дислокационные скопления высокой плотности.

Результаты испытаний (таблица 2) показали, что смешанная структура, полученная в результате скоростного нагрева импульсом электрического тока с последующей деформацией, обладает высокими характеристиками пластичности и вязкости разрушения.

Итак, несмотря на присущую титановому сплаву ВТ6С склонность к интенсивному росту зерен при нагреве до β-области, на практике могут быть

созданы условия за счет скоростного нагрева импульсом электрическим током с последующей деформацией, позволяющей получить смешанную частично рекристаллизованную структуру.

Таблица 2 – Механические свойства заготовок из листа сплава ВТ6С в зависимости т типа структуры

Тип структуры	Характеристика структуры, мкм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ, %	φ, %	K_{1c}, кгс/мм$^{3/2}$	σ_{-1}, на базе $5 \cdot 10^4$ МПа
		МПа					
Пластинчатая	Размер α-пластин 11,5	955	912	3,6	7,2	237	47
	Размер α-пластин 3,5	905	872	7,3	9,2	238	47
Смешанная	Размер α-глобул 12,1	925	883	3,4	15,1	252	51
	Размер α-глобул 3,5	865	822	14,8	27,3	270	48

Помимо амплитудного значения тока в импульсе и длительности самого импульса на формирование конического выступа влияет темп нарастания усилия осадки электродов (темп деформирования). Эксперименты показали, что при темпе осадки менее 18–20 мм/с наблюдается образование трещин на поверхности выступа. В диапазоне значений темпа деформирования 21–33 мм/с конический выступ формируется с гофрами на поверхности. При значении скорости осадки более 38 мм/с отмечается формирование конической поверхности выступа без трещин и гофр.

Внешний вид заготовки тарелки игольчатой втулки, после деформирования конического выступа, показан на рисунке 7.

а б

Рисунок 7 – Внешний вид тарелки втулки после импульсного нагрева и деформирования конусного выступа и механической зачистки:
а – с внешней стороны; б – с внутренней стороны (видна граница зоны нагрева)

Четвертая глава посвящена исследованию влияния скорости охлаждения сплава ВТ6С при формировании конического выступа в тарелке

игольчатой втулки, а также влиянию искусственного старения на структуру и твердость материала в зоне выступа.

Скорость охлаждения заготовки после деформирования с нагревом импульсом электрического тока оказывает влияние на структуру сплава ВТ6С. Для оценки влияния скорости охлаждения на структуру сплава ВТ6С в зоне конического выступа матрицу приспособления (рисунок 3) подвергали охлаждению за счет подачи во внутренние каналы холодной воды, а также нагреву – подачей горячей воды при температуре 95–98 °С.

В случае подачи горячей воды в матрицу приспособления скорость охлаждения заготовки снижается до 35–37 °С/с. При такой охлаждения наряду с первичной α-фазой, сохранившейся при нагреве, образуется вторичная α-фаза. Формируется типичная β-превращенная структура, границы зерен которой окантованы оторочкой α-фазы, а внутризеренное строение характеризуется наличием пластин α-фазы, имеющих одинаковую ориентировку в пределах отдельных фрагментов-колоний.

При охлаждении заготовки только за счет теплоотвода в материал матрицы приспособления скорость охлаждения составляет 42–47 С/с. Формирование структуры во многом аналогично случаю подогрева матрицы за счет пропускания горячей воды.

Увеличение скорости охлаждения заготовки более 65–70 °С/с (за счет охлаждения матрицы потоком холодной воды) инициирует образование структуры мартенситного типа. При быстром охлаждении полиморфное превращение β→α протекает по бездиффузионному мартенситному механизму с образованием игольчатой мартенситной структуры, обозначаемой α′ или при большей степени легированности – α″. Кристаллическая структура α, α′ и α″ практически однотипная (ГПУ), однако решетка α′ и α″ более искажена, причем степень искаженности возрастает с увеличением концентрации легирующих элементов. Титановый мартенсит является раствором замещения, и закалка титановых сплавов на мартенсит α′ приводит к небольшому упрочнению и не сопровождается резким снижением пластичности.

Эксперименты показали, что при деформировании заготовки игольчатой втулки из сплава ВТ6С после нагрева импульсом электрического тока деформирование происходит в интервале температур, начало которого соответствует β-области, окончание (α+β)-области. Образующаяся после такой обработки структура зависит от температурного интервала, приходящегося на (α+β)-область, и от степени деформации, проводимой в (α+β)-области. Так как степень деформации не превышает 15–20%, то структура отличается значительной локальной неоднородностью тем большей, чем шире температурный интервал (α+β)-деформации, и выражающейся в чередовании участков с α-пластинами, деформированными в резко различной степени.

Изучено влияние искусственного старения в диапазоне температур нагрева 460–580 °С с выдержкой 2 часа на структуру и свойства сплава ВТ6С

после скоростного нагрева импульсом электрического тока и деформирования. Для исследований были выбраны образцы, прошедшие нагрев импульсом тока до температур 920, 960 и 1040 °С. Последние две температуры выходят за пределы рекомендуемых для закалки сплава ВТ6С и представляет интерес, какими свойствами обладают эти структурные состояния. Механические свойства сплава ВТ6С после различных режимов обработки приведены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, наиболее высокую прочность и твердость демонстрирует сплав ВТ6С в состоянии после скоростного импульсного нагрева электрическим током до температуры 1040 °С с последующим старением в интервале температур 460–520 °С. Однако при этом необходимо отметить снижение пластических характеристик, особенно значений поперечного сужения (наиболее структурно чувствительной характеристики).

Рентгеноструктурный анализ исходных и обработанных по различным режимам образцов показал, что скоростной нагрев импульсом электрического тока с последующей деформацией приводит к уширению пиков на рентгеновских дифрактограммах и ослаблению интенсивности максимума пиков (102) (110) и (103) α-фазы при усилении пика (101).

Таблица 3 – Механические свойства сплава ВТ6С после различных видов обработки

Температура нагрева импульсом тока, °С	Осадка, %	Температура старения, °С	Длительность старения, ч	Механические свойства				
				σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	φ, %	HV, МПа
920	0	460	2					4275
	0	480	2	1125	1093	8,9	55	4465
	0	520	2					4360
	0	580	2					4155
	15	460	2					4120
960	0	460	2					4620
	0	480	2	1215	1175	9,1	52	4580
	0	520	2					4370
	0	580	2					4250
	15	460	2					4490
1040	0	460	2					4380
	0	480	2	1310	1240	7,2	34	4730
	0	520	2					4290
	0	580	2					4410
	15	460	2					4730
В исходном состоянии после отжига 750 °С, 1 час, охлаждение на воздухе сплав ВТ6С имел прочность 970 МПа при относительном удлинении 13% и твердости 3390 МПа								

Это указывает на формирование кристаллографической текстуры. Фазовый состав сплава практически не изменяется. В образцах после нагрева импульсом тока до 920 °С с осадкой и без с последующим старением при 460

°С количество β-фазы несколько уменьшается (с 5,9 % до 2,1 %) ввиду протекания превращения $\beta \rightarrow (\alpha, \alpha'') + \beta_{ост}$. С повышением температуры закалки до 1040 °С и выше количество β-фазы вновь увеличивается.

После импульсного нагрева током высокой плотности и последующей деформации в нагретом состоянии размер областей когерентного рассеяния (ОКР) уменьшается в 3,3 раза, а микродеформация решетки увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным состоянием, параметр решетки *a* уменьшается, параметр *c* изменяется незначительно.

При этом следует отметить, что степень дисперсности структуры при осуществлении деформации выше, чем без нее.

При нагреве титанового сплава ВТ6С импульсом электрического тока до температуры выше 900 °С время пребывания сплава при повышенной температуре мало. Данное обстоятельство в сочетании с ограниченным объемом между матрицей и пуансоном, заполненным воздухом, ограничивает процесс окисления сплава ВТ6С в процессе нагрева и деформирования. Анализ толщины оксидной пленки TiO_x показал, что его толщина не превышает 9,5–12 мкм.

В идеальном случае, при полном окислении на каждый атом титана должно приходится два атома кислорода (TiO_2), то есть содержание кислорода должно составлять 66%, а титана 33%. Из анализа состава пленки TiO_x следует, что содержание кислорода составляет 59,9%, а содержание титана 40,1%. Полученное соотношения говорит о том, что в пленке имеется избыток титана.

В пленке TiO_x на один атом кислорода приходится больше атомов титана, чем в стехиометричной пленке TiO_2, следовательно, она должна обладать большей проводимостью. Замеры электрического сопротивления показали, что электрическое сопротивление пленки TiO_x составляет $5{,}1 \cdot 10^3$ Ом, в то время как сопротивление пленки TiO_2 составило $2{,}9 \cdot 10^6$ Ом.

Пятая глава посвящена промышленному освоению предложенной технологии изготовления игольчатого крепежа, оценке прочностных свойств неразъемных соединений иголок с тарелкой втулки, натурным испытаниям игольчатых втулок при фиксации деталей из композиционных материалов и оценке ресурса оснастки для деформирования конусного выступа.

Результаты исследований, полученные в данной диссертационной работе, послужили основой для разработки технологического процесса изготовления игольчатого крепежа.

На основе предложенного технологического процесса были изготовлены игольчатые втулки с коническим выступом (под замок) диаметром 56 мм с одним и двумя рядами иголок (рисунок 8).

Натурные испытания игольчатых втулок показали, что разрушение иголок происходит исключительно на срез при наличии в соединении литого ядра между иголкой и тарелкой. При отсутствии литого ядра разрушение иголок имеет смешанный характер, как на срез так и на отрыв.

Для повышения прочности соединений иголки с тарелкой втулки без литого ядра эффективным является нагрев до 650–700 °С с выдержкой в течение 1–1,5 часа. Повышение значения разрушающей нагрузки на отрыв составляет 16–19%.

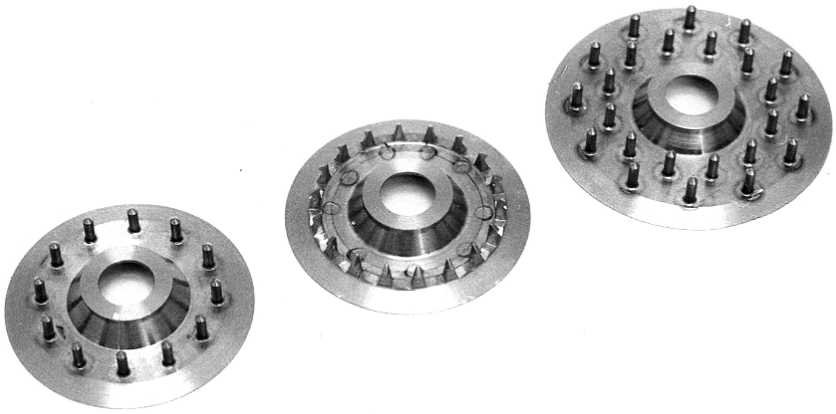


Рисунок 8 – Игольчатые втулки из титановых сплавов с одним и двумя рядами иголок, изготовленные с применением результатов проведенных исследований

Промышленное освоение предложенной технологии показало, что при изготовлении пуансона и матрицы приспособления для деформирования листовых заготовок из сплава ВТ6С из бериллиевой бронзы обеспечивается гарантированное качественное изготовление до 140–150 тарелок. После этого требуется провести ремонт или замену пуансона. Матрица обеспечивает получение до 450 тарелок втулок без ремонта или замены.

Таким образом, в целом задачи, поставленные в данной диссертационной работе, выполнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что скоростной импульсный нагрев электрическим током титанового сплава ВТ6С до температуры порядка 1050 °С не вызывает интенсивного роста зерна. При таком нагреве с выдержкой 0,2–0,8 с размер зерна не превышает 40–65 мкм. В тоже время при печном нагреве до указанной температуры размер зерна составит 350–370 мкм.

2. На основании расчетов и результатов экспериментов показано, что нагрев листовых заготовок из сплава ВТ6С до требуемых температур перед деформированием будет обеспечиваться при амплитудном значении тока 3,0–5,0 кА при его длительности 0,2–0,5 с. Диаметр зоны нагрева составляет 25–30 мм практически во всем исследованном диапазоне значений силы тока в импульсе.

3. Скоростной импульсный нагрев электрическим током позволяет осуществлять деформирование конического выступа тарелки игольчатой втулки как из β, так и из α+β-области. Степень деформации при формировании конического выступа не превышает 15%. Измельчение зерен в случае деформации из β-области более значительно, чем при α+β-деформации. Это объясняется развитием процесса первичной рекристаллизации в деформированной β-структуре, вызывающей появление новых зерен.

4. Определены особенности влияния старения на микроструктуру деформированного в горячем состоянии конического выступа заготовки из сплава ВТ6С. Старение при 460–520 °С сопровождается дальнейшим измельчением зерен α-фазы. После старения объемная доля зерен первичной α-фазы уменьшается до 10–30 % в зависимости от режима обработки.

5. Показано, что при темпе деформации более 38 мм/мин нагретого материала листовой заготовки сплава ВТ6С на поверхности формируемого выступа отсутствуют складки, гофры и микронадрывы.

6. Установлено, что при скоростях охлаждения деформируемого металла конического выступа с температур β-области более 63–65 °С/с способствует формированию структуры мартенситного типа. После охлаждения со скоростью 4–5 °С/с образуется структура, напоминающая структуру видманштеттового типа.

7. После скоростного импульсного нагрева электрическим током, последующей деформации в нагретом состоянии и искусственного старения размер областей когерентного рассеяния (ОКР) уменьшается примерно в 3,3 раза, а микродеформация решетки увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным состоянием.

8. Для повышения прочностных характеристик (величины разрушающего усилия на отрыв) неразъемных соединений иголок с тарелкой игольчатой втулки рекомендуется проведение термической обработки соединения при температуре 900–950 °С в течение 10–20 минут.

9. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению игольчатого крепежа, на базе которых изготовлены серийные партии игольчатых втулок.

10. На основе результатов изготовления установочных партий игольчатых втулок установлено, что приспособление для деформирования листовых заготовок обеспечивает изготовление 140–150 изделий.

ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Овчинников В.В. Исследование процесса локального деформирования листовых заготовок из титановых сплавов с импульсным нагревом электрическим током. /Овчинников В.В., **Смирнов С.В**., Гуреева М.А. //Машиностроение и инженерное образование. – 2007.– №1. – С.35-41.

2. Овчинников В.В. Разработка технологии изготовления сварных игольчатых втулок для крепления деталей из композиционных материалов. /Овчинников В.В., **Смирнов С.В.**, Гуреева М.А. //Заготовительные производства в машиностроении. – 2009.– №1.– С.18-21.

3. Овчинников В.В. Разработка технологии изготовления игольчатого крепежа для фиксации деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов. /Овчинников В.В., **Смирнов С.В.**, Гуреева М.А.// Технология металлов. – 2009. –№2. – С.40–45.

4. **Смирнов С.В.** Структура листовых заготовок из титанового сплава ВТ6С после локального деформирования при импульсном нагреве электрическим током. / Смирнов С.В., Овчинников В.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2020, т.18, №11. – С.512–519. DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-11-512-519.

5. **Смирнов С.В.** Влияние режима локального деформирования с импульсным электронагревом на структуру заготовок из титанового сплава ВТ6С. // Смирнов С.В., Овчинников В.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021, т.19, №5. – С.234–240. DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-5-234-240.

Статьи в других изданиях, труды научно-практических конференций

6. Овчинников В.В. Исследование процесса контактной сварки штыря к пластине при изготовлении игольчатых втулок. / Овчинников В.В., Антонов А.А., **Смирнов С.В.**// Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве :материалы Российской научно-практической конференции. 20-21 сентября 2007 г. – Рыбинск: РГАТУ– Т.1. – С.168-172.

7. **Смирнов С.В.** Влияние схемы сборки на формирование соединения между иголкой и тарелкой при контактной точечной сварке. / Смирнов С.В., Овчинников В.В. //Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 10-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (15–16 апреля 2020 года) – Курск: Юго–Зап. гос. ун-т, 2020. – 355 с.; С.290-298; ISBN 978-5-9908273-1-9.

Патенты на изобретения и полезные модели

8. Патент 53201 U1 Российской Федерации на полезную модель, МПК B23K 11/00. Устройство для деформирования листовых заготовок из титановых сплавов при их нагреве. / Овчинников В.В., Алексеев В.В., Верденский В.Б., **Смирнов С.В.** : патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2005133772; заявл. 01.11.2006; опубл. 10.05.2006. Бюл. №13.

9. Патент 64547 U1 Российской Федерации на полезную модель, МПК B23K 9/16. Устройство для приварки цилиндрических деталей типа шпилек к плоским изделиям. / Овчинников В.В., Лопаткин А.И., Яковлев Г.В.,

Смирнов С.В. : патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2007108110; заявл. 06.03.2007; опубл. 10.07.2007. Бюл. №19.

10. Патент 2325966 С2 Российской Федерации на изобретение, МПК B21D22/02. Способ изготовления деталей из листовых заготовок с выступами в виде тел вращения./Овчинников В.В., Лопаткин А.И., Верденский В.Б., **Смирнов С.В.**, Силина В.И. :патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2006110080; заявл. 30.03.2006: опубл. 10.10.2007. Бюл. №16.

11. Патент 2333085 С2 Российской Федерации на изобретение, МПК B23K 11/00.Способ контактной точечной сварки заклепки с пластиной из титановых сплавов. / Овчинников В.В., Лопаткин А.И., Верденский В.Б., Алексеев В.В., **Смирнов С.В.**: патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2006132798; заявл. 13.09.2006; опубл. 10.09.2008. Бюл. №25.

12. Патент 2352440 С2 Российской Федерации на изобретение, МПК B23K11/14.Способ контактной точечной сварки штыря с пластиной из титановых сплавов. / Лопаткин А.И., Овчинников В.В., Верденский В.Б., Алексеев В.В., **Смирнов С.В.**: патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2007114791; заявл. 19.04.2007; опубл. 20.04.2009. Бюл. №11.

13. Патент 2352441 С2 Российской Федерации на изобретение, МПК B23K11/14. Способ контактной точечной сварки стержня с пластиной / Лопаткин А.И., Овчинников В.В., Верденский В.Б., Алексеев В.В., **Смирнов С.В.**: патентообладатель АО "РСК "МиГ". – №2007127565; заявл. 19.07.2007; опубл. 20.04.2009. Бюл. №11.

Подписано в печать 22.10.2021
Формат А5
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Тираж 100 Экз. Заказ № ХП-471542-10-21
Типография ООО «МДМпринт»
(Печатный салон МДМ)
119146, Москва, ул. Комсомольский пр-кт, д. 28
Тел. 8 – 495-256-10-00