Модернизация установки для диффузионной сварки УДС-1 на этапах совершенствования технологии получения неразъемных соединений разнородных материалов в двигателестроении

Марчуков Е.Ю., Чуклинов С.В., Денисов Л.В.
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва
e-mail: evgeny.marchukov@okb.umpo.ru

Рассмотрена технология соединения материалов методом диффузионной сварки. Представлена модернизированная установка УДС-1 с непрерывным циклом загрузки-выгрузки деталей. Рассмотрено программное обеспечение, позволяющее автоматизировать данный процесс. Приведены результаты исследований образцов.

Ключевые слова: диффузионная сварка, оборудование, программное обеспечение, автоматизация

Введение

Тенденции совершенствования материалов для аэрокосмической отрасли диктуют новые требования к методам их соединения. Необходимость изготавливать детали и узлы, работающие при высоких нагрузках и температурах, обладающие при этом малой массой, хорошей сопротивляемостью знакопеременным усилиям и усталостному разрушению, высокой прочностью, расширяет область применения композитов, высокотемпературных керамических материалов, интерметаллидных сплавов, сплавов с заданной пористостью [1].

Для достижения наилучших результатов узел или деталь могут изготавливать из различных групп материалов, выбранных по функциональному назначению, применяя при этом такие методы соединения, как сварка, пайка, клепка, склеивание и т.д. В большинстве случаев материалы не позволяют производить их соединение с требуемой прочностью и в желаемых комбинациях. Соединение традиционных металлов и сплавов с неметаллическими материалами, в том числе композиционными, является на сегодняшний день актуальной задачей в двигателестроении.

Одним из перспективных способов соединения разнородных материалов является диффузионная сварка, разновидность сварки давлением, которая за счет нерасплавления контактирующих поверхностей, $(0{,}7\ldots0{,}9)T_{\text{пл}}$, обеспечивает качественное соединение различных жаропрочных сплавов между собой и с другими современными материалами.

Диффузионная сварка как метод соединения материалов впервые предложена профессором Н.Ф. Казаковым в 1953 году [2]. В последующем на «способ диффузионного соединения различных металлов, сплавов и материалов в вакууме и устройства для осуществления этого способа» Н.Ф. Казаков получил патенты в Бельгии, Англии, Франции, США, Японии, Швеции. Столь широкое признание и востребованность созданного метода соединения материалов уже в те годы подчеркивали его экономическую эффективность, универсальность применения, технологичность процесса, перспективность для дальнейших разработок. Первый положительный отечественный опыт использования технологии диффузионной сварки в двигателестроении был получен в 2001 году (ЗАО «Авиационные технологии. Инжиниринг и консалтинг») при соединении сплавов ВЖЛ12У и ЭИ961 [1]. На базе данных исследований и были созданы отечественные образцы оборудования для двигателестроительной отрасли.

Согласно формулировке, принятой в 1973 году IV комиссией Международного института сварки (Дюссельдорф, ФРГ), «диффузионная сварка в твердом состоянии – способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомном уровне, появившихся в результате максимального сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов». Определение, данное в ГОСТ 2601-84: «Диффузионная сварка – сварка давлением, осуществляемая за счет взаимной диффузии атомов в тонких поверхностных слоях контактирующих частей. Диффузионная сварка осуществляется при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации».

Диффузионная сварка обладает рядом преимуществ [3]:

– сварка соединяемых материалов в твердой фазе, при температурах 70…90% температуры плавления наиболее легкоплавкого материала;

– возможность соединения сплавов друг с другом и неметаллами (стекло, керамика, композиционные материалы);

– прочность шва эквивалентна прочности свариваемых материалов или превосходит ее;

– получение деталей различных габаритов;

– соединение в скрытых и труднодоступных местах;

– получение деталей сложной конструкции;

– формирование соединения с большой площадью сварной зоны;

– сварка с высокой точностью, с минимальными припусками;

– процесс легко автоматизировать.

Диффузионная сварка относится к наиболее универсальному типу сварки [4] с основными и дополнительными параметрами: *p, T, A, f, t*. Здесь *p* – давление сварки, необходимое для формирования физического контакта за счет микропластической деформации взаимодействующих поверхностей. *T* – температура сварки: с повышением температуры ускоряется процесс микропластической деформации взаимодействующих поверхностей. *A* – защитная среда: применение вакуума или инертной защитной среды предотвращает окисление свариваемых материалов и образование вредных примесей в сварном соединении, отпадает необходимость в использовании флюсов. *f* – интенсифицирующий параметр, позволяющий ускорить процесс сварки за счет циклического изменения давления и температуры, наложения ультразвуковых колебаний, приложения электростатических полей, предварительной лазерной обработки свариваемых поверхностей [5; 6], применения промежуточных слоев [7] и т.д. И наконец, *t* – время сварки, необходимое для протекания ряда сложных физико-механических процессов: диффузии, зарождения и перемещения вакансий и дислокаций, рекристаллизации и т.д.

Для достижения качественного соединения необходимо обеспечить поддержание требуемых параметров технологического процесса на протяжении всего цикла сварки, от нагрева образцов с заданной скоростью до полного охлаждения полученной детали. Так, в некоторых случаях процесс охлаждения может происходить в течение 5 ч и более со скоростью 3…7 °С/мин [7]. Это особенно важно для сварки неметаллических материалов друг с другом и с металлами.

Разнородные материалы обладают разными механическими и физико-химическими свойствами, и в сформированном соединении таких деталей могут возникать напряжения, вызванные различием температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Поэтому в большинстве случаев при диффузионной сварке разнородных материалов и сплавов обязательно используют промежуточные слои (прокладки) как один из способов интенсификации процесса, снижающий химическую неоднородность соединения и устраняющий влияние сильно различающихся ТКЛР свариваемых материалов. Как правило, при соединении диффузионной сваркой жаропрочных сплавов используют никель, который обладает необходимыми физико-химическими свойствами [1].

Современное отечественное оборудование позволяет добиться качественных результатов с приемлемой производительностью благодаря автоматизации процесса на всех этапах производственного цикла диффузионной сварки: получение требуемой степени вакуума, выход на заданный температурный режим, сварка детали на необходимых режимах, последующее ее охлаждение и извлечение из сварочной камеры.

Модернизация установки УДС-1

Для решения задач по отработке технологических параметров и анализа характерных признаков процесса диффузионного соединения жаропрочных сплавов и керамических материалов, а также поиска метода его интенсификации была выполнена комплексная диагностика, профилактический ремонт и модернизация установки для диффузионной сварки УДС-1. Установка представляет собой модульную конструкцию, состоящую из камеры сварки, вакуумного оборудования, силовых шкафов и другого вспомогательного оборудования. Источником нагрева свариваемого изделия является нагреватель в виде ленты, изготовленной из ниобия. Для поддержания заданного температурного диапазона в процессе сварки, а также требуемой интенсивности нагрева и охлаждения соединяемых деталей установка в процессе модернизации была снабжена инверторным блоком питания.

Для осуществления процесса диффузии между поверхностями свариваемых деталей в сварочной камере необходимо обеспечить вакуум не ниже 10^{-2} мм рт. ст. В процессе нагрева происходит частичное испарение со свариваемых поверхностей окислов и загрязнений, трудноудаляемых даже на этапе подготовки поверхностей под сварку, и последующее их оседание на стенках сварочной камеры. По этой причине использовавшийся ранее теплозащитный экран из керамического волокна был заменен на экран из листа молибдена. Это снизило интенсивность осаждения летучих элементов на поверхность экрана и позволило производить при необходимости его механическую очистку. Сжимающее усилие на свариваемые детали передается от электромеханической системы.

Механизм вращения внутри главной камеры перемещает в горизонтальной плоскости планшайбу, на которой расположены четыре съемных рабочих стола для сборки деталей под сварку. Механизм приложения нагрузки выполняет две функции: перемещает рабочие столы в вертикальном направлении и обеспечивает передачу сварочного давления к деталям во время сварки. Сверху на камере имеются три отверстия – камеры загрузки, сварки и выгрузки. Они расположены строго над рабочими столами планшайбы. Камеры загрузки и выгрузки закрываются вертикально перемещающимися колпаками (шлюзы загрузки и выгрузки). Револьверная система перемещения и подачи заготовки в камеру сварки в совокупности с отдельными шлюзами загрузки и выгрузки позволяет построить непрерывный цикл сварки партии деталей. Исключается один из ключевых недостатков технологических процессов такого типа – необходимость в периодическом создании вакуума с последующим напуском атмосферы в камеру сварки для загрузки и выгрузки деталей.

Для достижения среднего и высокого вакуума в камере сварки необходимо обеспечить защиту ее поверхностей от внешних и внутренних загрязнений и возможной коррозии элементов в процессе эксплуатации.

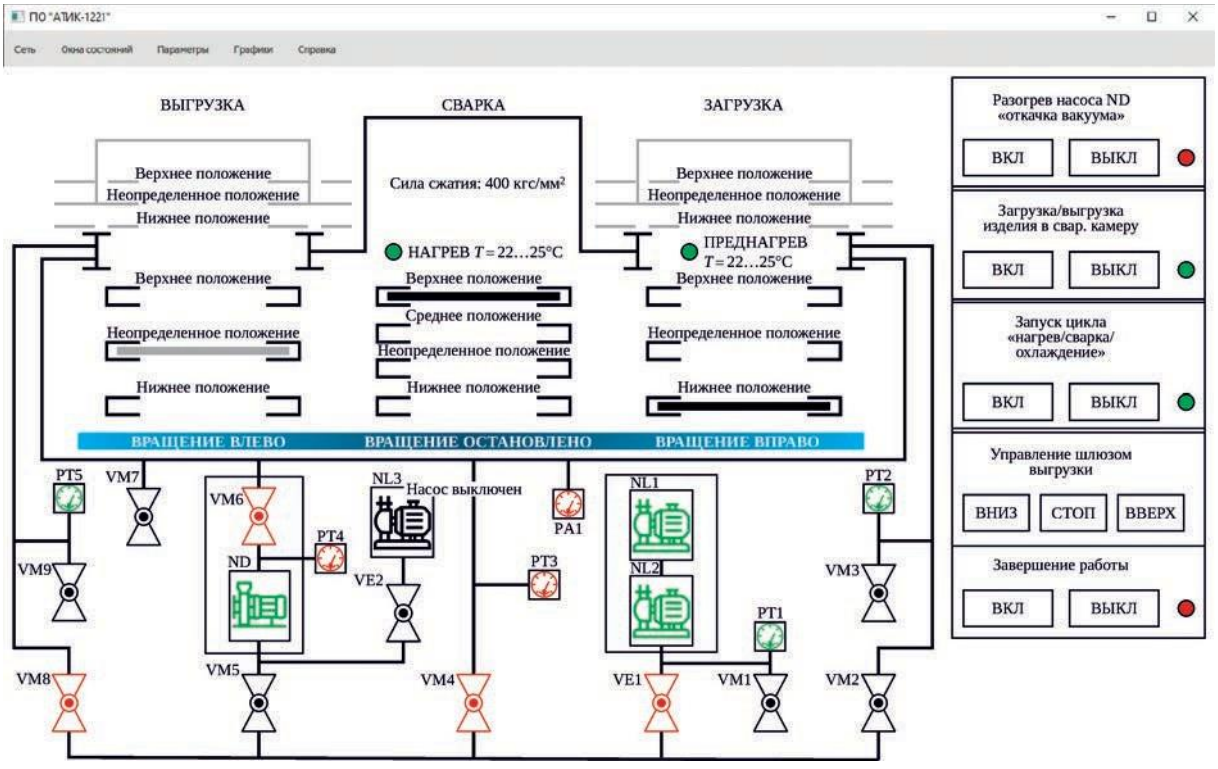


Рис. 1. Модернизированное программное обеспечение

Для этого металлические элементы вакуумной камеры целесообразно изготавливать из нержавеющих материалов. Также нужно конструктивно обеспечить легкий доступ ко всем внутренним поверхностям вакуумной камеры для последующей профилактической очистки.

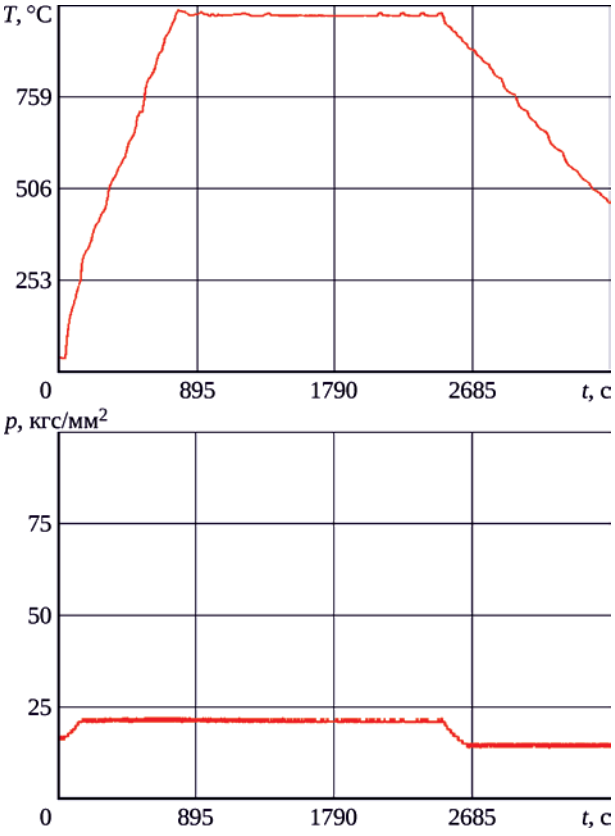


Рис. 2. Визуальное представление параметров сварки

Оснащение установки двухуровневой системой управления обеспечивает проведение технологического процесса в наладочном, ручном, автоматическом режимах. На нижнем уровне системы управления применяется программируемый логический контроллер DL-205. Он обеспечивает сбор и обработку информации от датчиков температуры и положения. Каждый контролируемый параметр на стадии его определения подвергается стандартной математической обработке, которая включает: масштабирование полученных сигналов, контроль достоверности логического анализа значений взаимосвязанных параметров, выбраковку ложных сигналов, контроль нарушения заданного диапазона измерения.

Прикладная программа DL-205 обеспечивает:

– в наладочном режиме – управление механизмами и устройствами подсистем установки (вакуумной, перемещения механизмов) для выполнения наладочных, ремонтно-профилактических работ;

– в ручном режиме – управление подсистемами установки в случае сбоя автоматического режима;

– в автоматическом режиме – автоматический цикл работы установки при условии делегирования права управления от персонального компьютера;

– контроль аварийного состояния механизмов и датчиков установки.

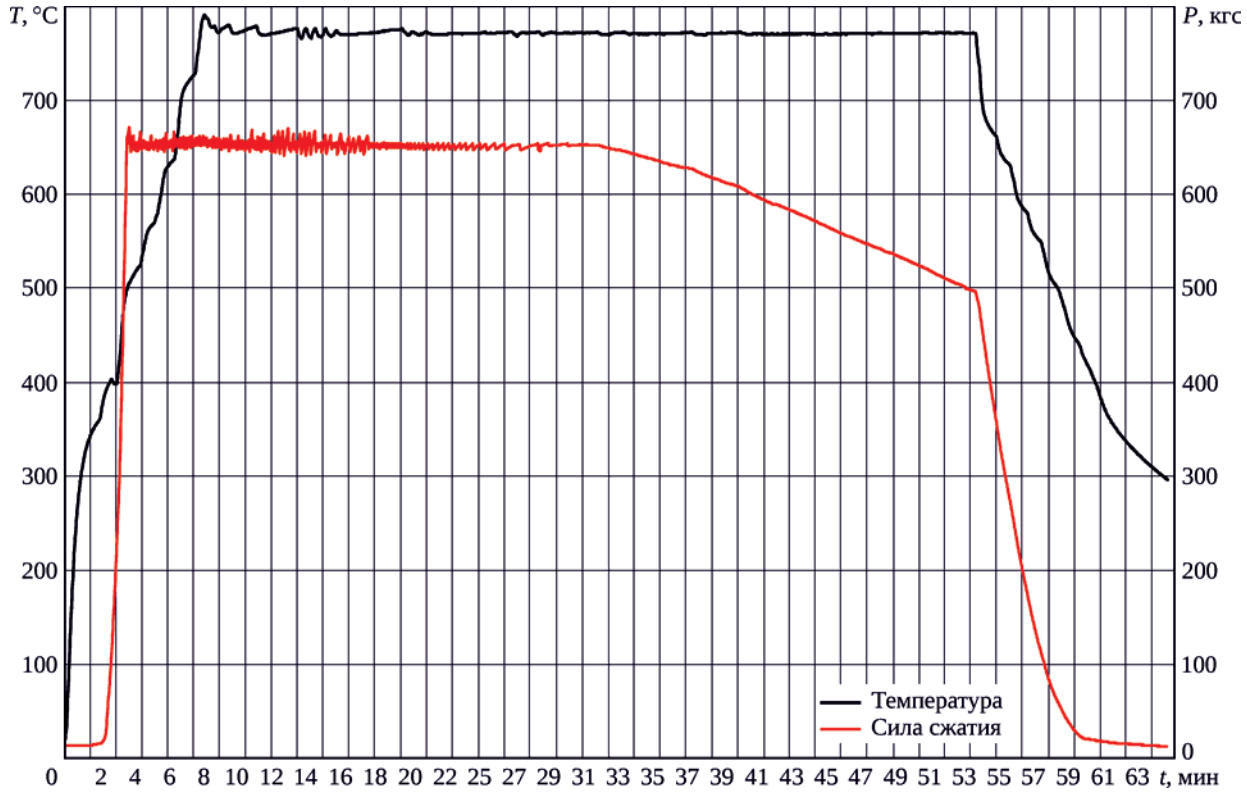


Рис. 3. Циклограмма процесса сварки, начало пластической деформации образцов (ХН60ВТ-ВТ20) с 32-й минуты

Описанные манипуляции всех механизмов и устройств выполняются в полном соответствии с программой, заложенной в программируемый контроллер. Нужно отметить, что предусмотренный ручной режим важен для отработки режимов диффузионной сварки новых материалов и изделий.

На верхнем уровне системы управления используется персональный компьютер. Программное обеспечение осуществляет запись и архивирование технологических параметров, управление циклами сварки, визуальное представление состояния основных узлов и блоков установки (рис. 1). Визуализируются в реальном времени графики температуры и давления (рис. 2), а также сопутствующая отладочная информация.

Реализованная после модернизации среда управления в совокупности с модернизированным инверторным источником питания, оптимизированными алгоритмами программируемого логического контроллера, а также системой измерения линейных перемещений позволяет получать сварные соединения из материалов в оптимальных технологических режимах.

Возможность отслеживать начало пластической деформации образцов, а также регулировать деформацию образцов или промежуточных слоев в процессе

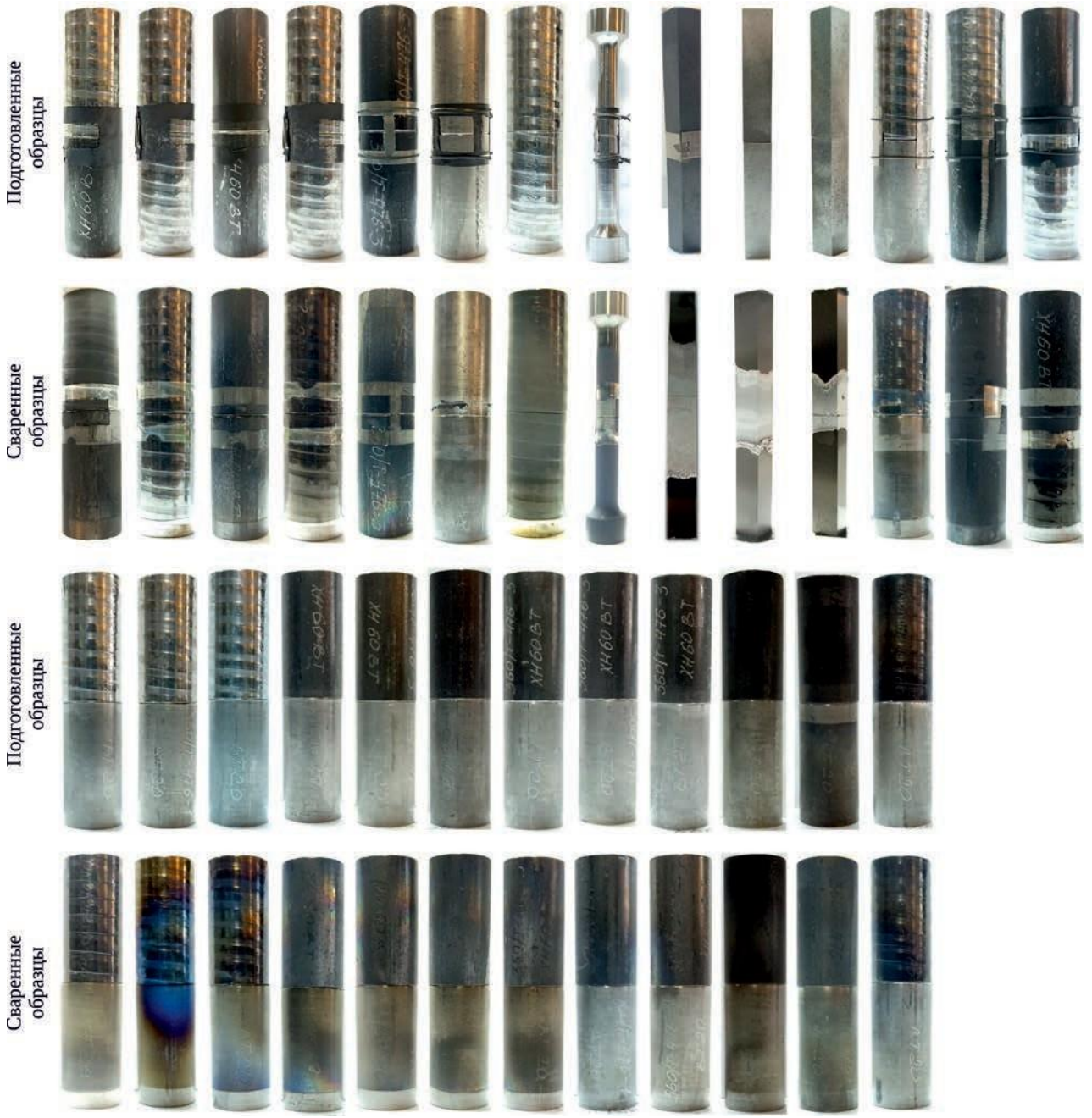


Рис. 4. Сваренные группы из материалов ЭП866, ХН60ВТ, ВТ20, ЖС6У, SiC

сварки позволяет оценить влияние температуры и времени сварки на характер получаемых соединений (рис. 3).

При соединении материалов из керамики особое внимание следует уделять применяемой оснастке. Различие в свойствах материалов оснастки и свариваемых образцов (модуль упругости, ТКЛР) может приводить к нежелательным смещениям, отклонениям давления сварки от расчетных значений, неоптимальным режимам сварки и, как следствие, получению некачественного диффузионного соединения.

Исследования образцов

На модернизированном оборудовании успешно выполнены циклы сварки групп жаропрочных материалов, в том числе получены соединения групп из керамических материалов с применением промежуточного слоя в виде никелевой фольги НП2 (Ni) толщиной 0,05 мм (рис. 4). Целью данных экспериментов являлась отработка технологических возможностей модернизированного оборудования.

Для первичной оценки характеристик и свойств получаемых сварных соединений проведен ряд исследований и испытаний на разрыв следующих групп: ЭП866-Ni-ВТ20 (группы № 1 и 2), ХН60ВТ-Ni-ВТ20 (группы № 3…5), ХН60ВТ-ВТ20 (группа № 6). Образцы представляют собой цилиндры высотой 40 мм и диаметром 20 мм.

Подготовка свариваемых поверхностей и образцов в целом включала в себя:

– формирование необходимой шероховатости поверхности (точение, шлифование);

– активацию свариваемых поверхностей (создание заданного микрорельефа) для формирования более развитой поверхности и оптимального начала этапа пластических деформаций;

– очистку образцов и свариваемых поверхностей обезжиривающими средствами.

Табл. 1. Режимы сварки для различных групп материалов

Группа	p, кгс/мм^2	T, °С	t, мин
ЭП866-Ni-ВТ20			
№ 1	2,98	830	30
№ 2	3,45	791	40
ХН60ВТ-Ni-ВТ20			
№ 3	1,70	900	50
№ 4	1,77	870	40
№ 5	3,45	795	40
ХН60ВТ-ВТ20			
№ 6	3,77	760	45

При исследованиях и испытаниях использовалось следующее оборудование:

– при испытаниях на разрыв – универсальная испытательная машина Autograph AG-X plus 100 kN фирмы Shimadzu (Япония);

– при растровой электронной микроскопии (РЭМ) – микроскопы Ultra 55 фирмы Carl Zeiss (Германия) и Scios 2 DualBeam фирмы ThermoFisher Scientific (США);

– при энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) – станция для энергодисперсионного спектрального анализа фирмы Bruker (Германия).

Режимы сварки представлены в табл. 1. Для получения сварных соединений групп № 1 и 2 применялся промежуточный слой – Ni. Группа № 1 разрушилась по сварному шву при падении на бетонный пол с высоты 1,5 м. В разрушенном сварном шве, на поверхностях образцов ЭП866 и ВТ20, различимы частички никелевой фольги (рис. 5). Также определяются участки с невзаимодействовавшей (исходной) поверхностью, что говорит о неполном процессе взаимодиффузии материалов.

Группа № 2 разрушилась по сварному шву во время испытаний на разрыв при нагрузке 162,4 МПа (16,56 кгс/мм^2), что говорит о некорректно подобранной технологии для получения прочного соединения

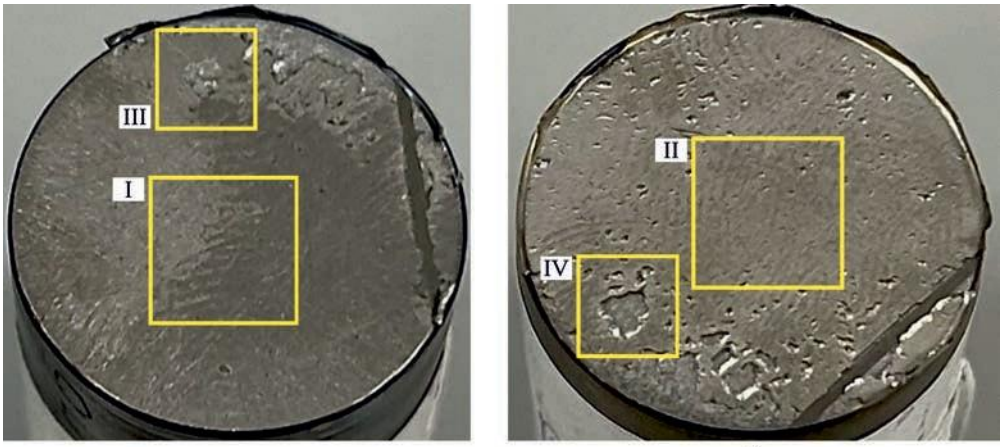


а *б*

Рис. 5. Характер разрушения сварного соединения группы № 1:
а – образец ЭП866; *б* – образец ВТ20

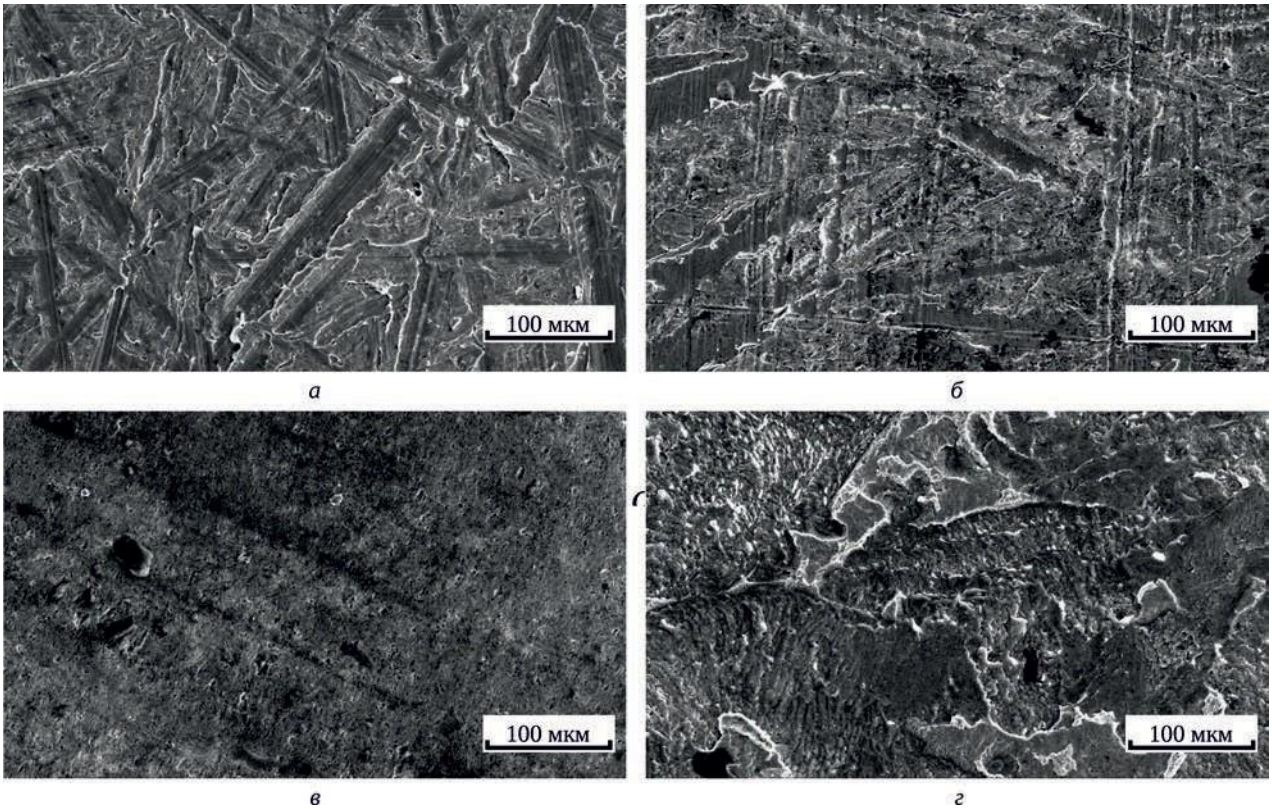
данной пары материалов, но позволяет косвенно оценить стабильность задаваемых на установке технологических параметров процесса диффузионной сварки.

После разрушения сварного соединения группы № 2 промежуточный слой в большей степени остался на поверхности образца ВТ20. Однако участки с приварившимся промежуточным слоем присутствуют и на поверхности образца ЭП866. На рис. 6 показаны соответствующие зоны: зона I – поверхность образца ЭП866, к которой не приварилась никелевая фольга; зона III – участок поверхности образца ЭП866, на котором после разрушения диффузионного соединения осталась область с приварившейся никелевой фольгой; зона II – никелевая фольга, приварившаяся к поверхности образца ВТ20; зона IV – поверхность образца ВТ20, к которой не приварилась никелевая фольга. Характерный, сохранившийся после процесса сварки исходный микрорельеф на поверхности образца (предварительно активированной поверхности, рис. 7,*а*) позволяет сделать заключение о неполной стадии пластической деформа-



а *б*

Рис. 6. Характер разрушения сварного соединения группы № 2:
а – образец ЭП866; *б* – образец ВТ20



а *б* *в* *г*

Рис. 7. РЭМ-съемка поверхности образцов группы № 2 после разрушения сварного шва:
а, *в* – зоны I и III образца ЭП866; *б*, *г* – зоны II и IV образца ВТ20

Табл. 2. Количественный ЭДС-анализ поверхности образцов ЭП866 и ВТ20 группы № 2

Элемент	ЭП866, зона I		ЭП866, зона III		ВТ20, зона II		ВТ20, зона IV	
	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %
Fe	62,77	57,96	0,52	0,30	15,88	13,37	–	–
Ni	15,30	13,44	63,54	35,70	71,30	57,10	11,70	9,01
Ti	–	–	–	–	0,73	0,72	79,90	75,47
Cr	12,83	12,73	0,51	0,32	5,36	4,85	–	–
Co	4,70	4,11	–	–	–	–	–	–
Al	–	–	–	–	–	–	5,93	9,94
Si	–	–	–	–	0,21	0,35	–	–
C	2,42	10,38	6,19	16,99	4,76	18,63	–	–
O	–	–	9,92	20,45	1,63	4,80	–	–
N	–	–	–	–	–	–	1,13	3,66
S	0,80	0,44	–	–	0,13	0,19	0,75	1,06
P	0,54	0,29	–	–	–	–	0,59	0,86
V	0,64	0,65	–	–	–	–	–	–
Mg	–	–	19,33	26,23	–	–	–	–

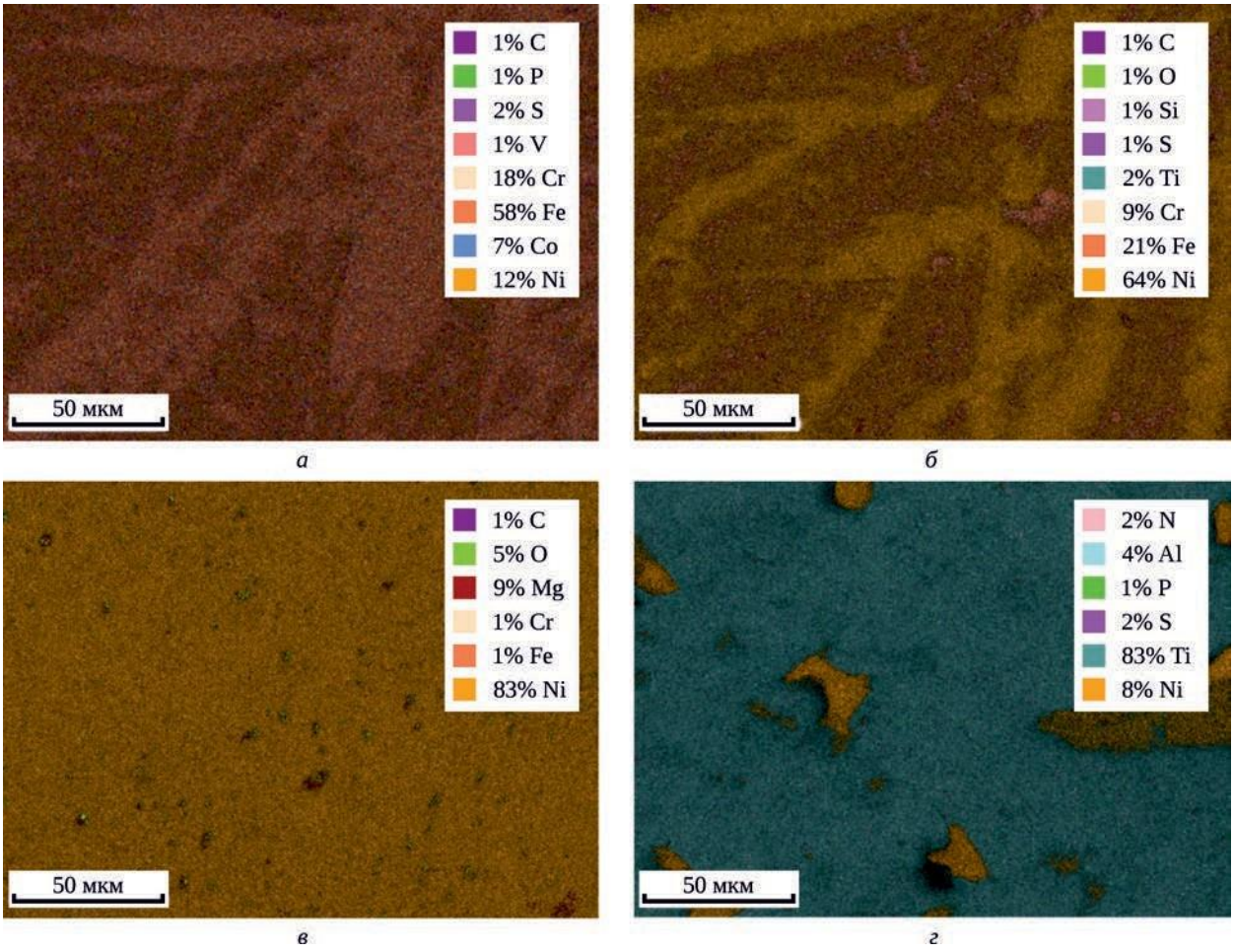


Рис. 8. Картирование распределения элементов на поверхности образцов группы № 2 (качественный ЭДС-анализ): *а*, *в* – зоны I и III образца ЭП866; *б*, *г* – зоны II и IV образца ВТ20

ции свариваемых поверхностей в процессе их диффузионного соединения. По результатам количественного ЭДС-анализа (табл. 2) диффузия элементов с одной свариваемой поверхности в другую наблюдается как на поверхностях образцов (зоны I и IV), так и на поверхности промежуточного слоя (зоны II и III). Результаты качественного ЭДС-анализа представлены на рис. 8.

Для получения сварных соединений групп № 3…5 (ХН60ВТ-Ni-ВТ20) также применялась никелевая фольга. Группы № 3 и 4 разрушились (рис. 9, рис. 10) при падении на бетонный пол с высоты 1,5 м. Группа № 5 разрушилась (рис. 11) во время испытаний на разрыв при нагрузке 134,7 МПа (13,74 кгс/мм^2), что также говорит о некорректно подобранной технологии для получения прочного соединения данной пары материалов. При этом в группах № 4 и 5 характер разрушения промежуточного слоя имеет схожий с разрушением групп № 1 и 2 фрагментарный рисунок с преобладающим привариванием никелевой фольги к поверхности образца ВТ20. Количественный ЭДС-анализ поверхности образцов группы № 5 представлен в табл. 3: частичная взаимодиффузия элементов присутствует как на свариваемых поверхностях образцов, так и на поверхности промежуточного слоя.

Локализация схватывания никелевой фольги с поверхностью ЭП866 в группе № 2 и ХН60ВТ в группе № 5 может быть следствием недостаточно качественной подготовки поверхностей под сварку (наличие остаточных загрязнений, окисной пленки), а также неравномерно распределенной нагрузки в процессе сварки.

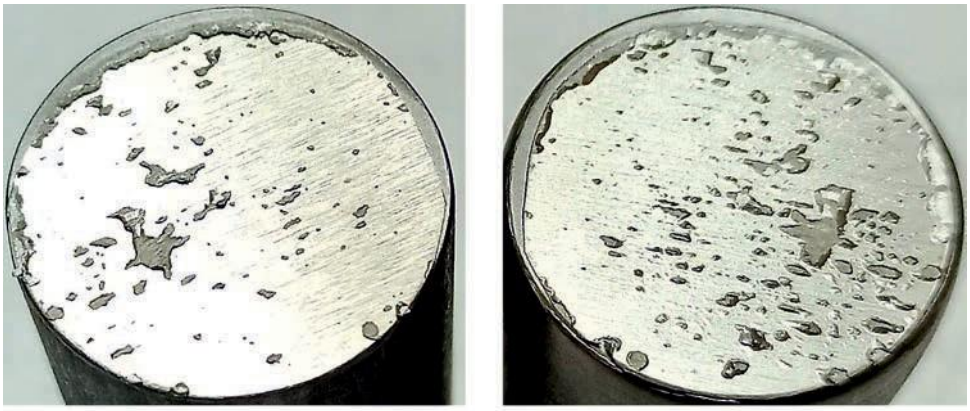
Наибольшим сопротивлением на разрыв обладала группа № 6, состоящая из образцов ХН60ВТ и ВТ20 без промежуточного слоя. Группа разрушилась во время испытаний на разрыв при нагрузке 187 МПа (19,07 кгс/мм^2). Диффузия элементов из сплава ХН60ВТ наблюдается на поверхности сплава ВТ20 и соответственно наоборот (рис. 12, табл. 4).

Проведенные исследования показали гибкость процесса диффузионной сварки, эффективность применяемых мероприятий по поиску и отработке технологии диффузионных соединений, а также целесообразность комплексных исследований и испытаний для оценки стабильности и качества получаемых соединений.



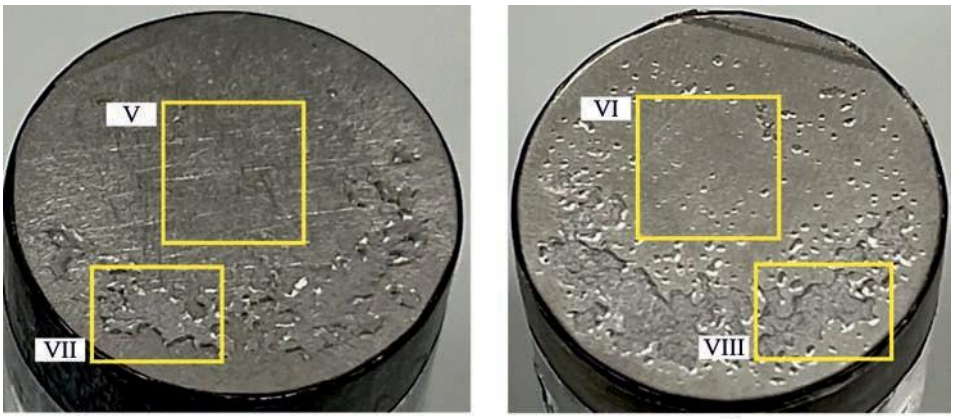
а *б*

Рис. 9. Характер разрушения сварного соединения группы № 3:
а – образец ХН60ВТ; *б* – образец ВТ20



а *б*

Рис. 10. Характер разрушения сварного соединения группы № 4:
а – образец ХН60ВТ; *б* – образец ВТ20

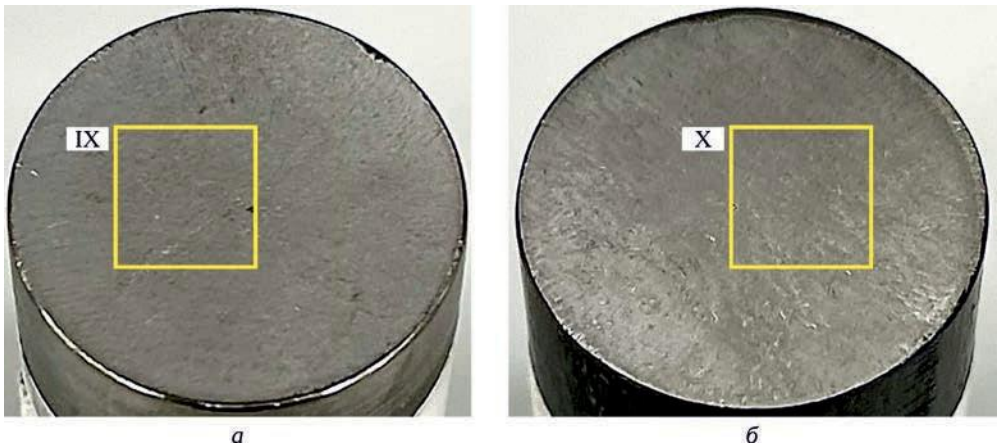


а *б*

Рис. 11. Характер разрушения сварного соединения группы № 5:
а – образец ХН60ВТ; *б* – образец ВТ20

Табл. 3. Количественный ЭДС-анализ поверхности образцов ХН60ВТ и ВТ20 группы № 5

Элемент	ХН60ВТ, зона V		ХН60ВТ, зона VII		ВТ20, зона VI		ВТ20, зона VIII	
	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %
Fe	1,63	1,38	–	–	0,80	0,68	–	–
Ni	56,18	45,24	45,40	35,19	86,99	70,59	14,48	10,36
Ti	1,52	1,50	47,34	44,97	1,06	1,06	74,51	65,34
Cr	23,10	21,00	–	–	4,45	4,08	–	–
Al	0,38	0,66	3,01	5,08	–	–	4,82	7,51
W	9,17	2,36	–	–	–	–	–	–
Si	0,02	0,04	–	–	0,75	1,28	–	–
C	6,81	26,79	3,67	13,91	4,66	18,47	4,59	16,06
O	–	–	–	–	1,29	3,84	–	–
P	–	–	0,58	0,85	–	–	–	–
Zr	–	–	–	–	–	–	1,44	0,66
Nb	–	–	–	–	–	–	0,16	0,07
Mn	1,20	1,03	–	–	–	–	–	–



а *б*

Рис. 12. Характер разрушения сварного соединения группы № 6:
а – образец ХН60ВТ; *б* – образец ВТ20

Табл. 4. Количественный ЭДС-анализ поверхности образцов ХН60ВТ и ВТ20 группы № 6

Элемент	ХН60ВТ, зона IX		ВТ20, зона X	
	масс. %	атом. %	масс. %	атом. %
Fe	1,14	0,86	1,42	1,17
Ni	37,74	27,02	35,35	27,79
Ti	38,76	34,01	25,83	24,90
Cr	11,35	9,18	22,10	19,62
Al	2,99	4,66	2,07	3,55
W	–	–	7,76	1,95
Si	1,32	1,97	–	–
C	6,16	21,56	5,47	21,02
P	0,54	0,74	–	–

Заключение

Дальнейшее совершенствование технологии диффузионной сварки материалов является перспективным способом получения неразъемных соединений из трудносвариваемых или не свариваемых традиционными методами сварки материалов. Модернизированное оборудование позволяет исследовать широкий диапазон технологических режимов диффузионной сварки различных материалов с оцифровкой параметров процесса сварки, внося корректировки в технологию, а также отрабатывать проектирование оснастки для обеспечения оптимальных процессов сварки.

В дальнейшем целесообразно провести исследования по отработке технологии диффузионного соединения материалов с подбором различных промежуточных слоев, а также формированию и совершенствованию методических требований к проведению исследований и испытаний полученных сварных соединений.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет создать современное отечественное оборудование для диффузионной сварки инновационных материалов, в том числе высокотемпературной керамики, а также керамокомпозиционных материалов.

Литература

1. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки / Глазов С.И., Люшинский А.В., Магнитов В.С., Обознов В.В., Чуклинов С.В. Рыбинск : Рыбинский дом печати, 2001. 288 с.
2. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1976. 312 с.
3. Диффузионная сварка материалов : справочник / В.П. Антонов, В.А. Бачин, Г.В. Закорин и др. ; под ред. Н.Ф. Казакова. М. : Машиностроение, 1981. 271 с.
4. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением : учебное пособие. Саратов : IPR MEDIA, 2009. 630, [1] с.
5. Лазерная обработка как метод интенсификации диффузионных процессов при сварке давлением / А.В. Люшинский, В.Е. Рогалин, Т.В. Малинский, Ф.И. Пантелеенко // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. статей I Международной научно-технической конференции. Могилев : Белорусско-Российский университет, 2022. С. 134–139.
6. Люшинский А.В., Петровский В.Н., Елкин В.Н. Влияние предварительной лазерной обработки поверхностей образцов стали 12Х18Н10Т на их диффузионную сварку // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 5. С. 22–29.
7. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов : учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М. : Академия, 2006. 208 с.

Материалы получены редакцией 09.11.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Марчуков Е.Ю., Чуклинов С.В., Денисов Л.В. Модернизация установки для диффузионной сварки УДС-1 на этапах совершенствования технологии получения неразъемных соединений разнородных материалов в двигателестроении // Авиационные двигатели. 2023. № 4 (21). С. 19–30.