

УДК 621. 791. 1

Е.В. КАРПОВИЧ, канд. техн. наук, доц. ДНУ им. О. Гончара,
Днепропетровск,
И.И. КАРПОВИЧ, ст. преп. ДНУ им. О. Гончара, Днепропетровск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В работе приведена математическая модель процессов, происходящих при диффузионной сварке деталей по охватываемым поверхностям контакта, и ее реализация методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus. На основе математической модели предложен алгоритм определения напряжений в биметаллическом соединении на каждом этапе диффузионной сварки. Ил.: 5. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: математическое моделирование, диффузионная сварка, метод конечных элементов, биметаллическое соединение.

Постановка проблемы. Многослойные металлические композиции широко применяются в узлах энергетических аппаратов, криогенной, ракетной и авиационной техники. Наиболее распространенными из них являются биметаллические переходники для соединения трубопроводов различного назначения с другими элементами системы. Основные эксплуатационные характеристики биметаллической конструкции, такие как прочность, герметичность, вакуумная плотность, зависят от способа получения соединений, наиболее перспективным из которых является диффузионная сварка, позволяющая соединять различные сочетания материалов.

Существуют три основные схемы диффузионной сварки трубчатых биметаллических переходников: торцовая, конусная и по охватываемым поверхностям [1]. С точки зрения технологии схема диффузионной сварки по торцам наиболее простая. По этой схеме все режимы сварки достаточно легко осуществляются и контролируются установкой для диффузионной сварки [2]. В эксплуатационных условиях, при действии внутреннего давления жидкости или газа повышенной или пониженной температуры, такие соединения испытывают напряжения изгиба, растяжения и среза, величина которых растет с увеличением различия в коэффициентах термического расширения (КТР) материалов деталей.

Диффузионная сварка переходников по конусным поверхностям аналогична сварке по торцам [1 – 3]. Трубные заготовки при нагреве

также сдвигаются в осевом направлении, только осевое усилие уменьшается пропорционально увеличению угла конуса таким образом, чтобы нормальное усилие сдвигания свариваемых поверхностей не отличалось от сварочного давления, применяемого для торцовых соединений. В соединениях труб по конусным поверхностям [1] в сварном соединении толщина стенки каждой трубы плавно изменяется от номинала до нуля. Термические напряжения по краям соединения в каждом металле на заостренных концах будут максимальными и могут достигать предела текучести или превышать его, что снижает надежность конструкции.

Переходники, сваренные по охватываемым поверхностям [1 – 3], отличаются более высокой технологичностью по сравнению с предыдущими двумя схемами сварки за счет возможности получения давления в контакте из-за разницы КТР материалов свариваемых деталей и использования не только специализированных установок для диффузионной сварки, но и обычных вакуумных печей, применяемых для пайки или отжига. В процессе эксплуатации переходников с развитыми поверхностями контакта картина нагружения меняется на более благоприятную, по сравнению с торцовой схемой переходника. Соединение будет воспринимать напряжения от действия внутреннего давления по всей длине, как единая конструкция, при этом касательные напряжения среза будут минимальными в средней части и максимальными на краях сварного шва. Величина последних зависит от длины контактных поверхностей свариваемых деталей и может ограничиваться требуемым уровнем прочности на этапе изготовления.

В процессе работы переходник трубопровода находится под действием внутреннего давления. При этом температура рабочей жидкости или газа внутри переходника может быть выше или ниже температуры окружающей среды, что приводит к появлению дополнительных термических напряжений в конструкции. В результате совместного действия силовых и температурных нагрузок в сварном шве переходника с охватываемыми поверхностями контакта возникают растягивающие или сжимающие напряжения. Вероятно, что растягивающие напряжения являются неблагоприятными, снижают эксплуатационные характеристики соединений и могут привести к разрушению. В тоже время сжимающие напряжения могут оказаться полезными и использоваться как дополнительный резерв повышения прочности и надежности биметаллических переходников. Для реализации положительного эффекта сжимающих напряжений в сварном соединении при эксплуатации переходника с охватываемыми поверхностями контакта требуется определение величины остаточных

напряжений на всех этапах диффузионной сварки. Таким образом, разработка математической модели технологии диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям контакта с целью определения остаточных напряжений на этапе изготовления и эксплуатации биметаллического переходника является актуальной теоретической и прикладной задачей.

Анализ литературы. Процесс диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям заключается в сборке деталей с натягом, обеспечивающим получение ювенильных контактных поверхностей и требуемого давления при температуре сварки, нагреве, выдержке собранной конструкции и охлаждении [1, 2, 4]. Обязательным условием получения сварного соединения является создание физического контакта соединяемых материалов, которое осуществляется путем пластического деформирования микронеровностей на контактных поверхностях. В процессе сборки свариваемых деталей деформация микронеровностей происходит с относительно высокими скоростями, что приводит к образованию у контактной поверхности слоя с повышенным сопротивлением пластической деформации, тормозящим образование физического контакта. Увеличение напряжения в контакте за пределы пропорциональности свариваемых металлов приведет к «проседанию» этого слоя на менее упрочненном основном металле. Повышение температуры приводит к разупрочнению и облегчению микропластической деформации, создавая благоприятные условия для развития физического контакта при меньших напряжениях в контакте. По мере увеличения площади микропластическая деформация не отличается от пластической и процесс образования физического контакта протекает с низкой интенсивностью за счет медленно протекающих диффузионных процессов [2, 4].

Диффузионная сварка производится при относительно высокой температуре, достигающей 0,7...0,8 температуры плавления более легкоплавкого материала конструкции [3]. При таких температурах в металле интенсивно протекают процессы релаксации и ползучести, в результате которых напряженное состояние в сборке за время выдержки меняется. Процесс изменения давления является неконтролируемым в отличие от сварки по торцам, при которой давление создается приложением внешнего контролируемого усилия.

После выдержки сварная конструкция охлаждается на воздухе до нормальной температуры. В соединениях, изготовленных из материалов с различным значением КТР, процесс охлаждения сопровождается появлением деформаций и напряжений, как в радиальном направлении,

так и по длине сварного шва. Величина возникающих напряжений может превышать прочность сварного соединения и привести к его разрушению.

В работе [5] представлена математическая модель диффузионной сварки для двухслойной осесимметричной конструкции и приведены результаты численного эксперимента, на основе которых разработаны рекомендации к технологии диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям, где показано, что наибольшее влияние на величину давления в контакте оказывают КТР свариваемых материалов и сварку деталей из любых их сочетаний необходимо проводить в технологической обойме. При этом задача решена в упругой постановке и в результате расчета величина давления в контакте будет завышенной по сравнению с упруго-пластическими условиями деформирования. Метод определения остаточных термических напряжений в многослойной осесимметричной конструкции представлен в работе [6], где рассматривается упругопластическая деформация тела вращения с различными условиями контакта между слоями. Однако, в работе [6] отсутствуют результаты численного расчета с рекомендациями для выбора геометрических параметров свариваемых деталей и обоймы и в обоих работах [5, 6] не учитывается явление ползучести и релаксации напряжений в процессе выдержки при температуре сварки.

На основе рекомендаций, приведенных в работе [5], возможных технологических схем диффузионной сварки соединений с развитыми цилиндрическими поверхностями контакта [2, 4], а также учитывая эксплуатационные условия биметаллических переходников, рассмотренные ранее, можно предложить следующие схемы диффузионной сварки переходников по охватываемым поверхностям:

1. При повышенной температуре рабочей среды внутри переходника, внутренняя деталь должна изготавливаться из материала с большим КТР, наружная – с меньшим КТР. В процессе сварки необходимо использовать внутреннюю обойму с КТР меньшим, чем у первой детали, что позволит предотвратить отставание свариваемых поверхностей при охлаждении соединения.

2. При пониженной температуре рабочей среды, внутренняя деталь должна изготавливаться из материала с меньшим КТР, наружная – с большим КТР. Внешняя обойма должна иметь меньший КТР, чем у второй детали, для предотвращения образования зазора между свариваемыми поверхностями в процессе нагревания соединения до температуры сварки.

3. Если температуры рабочей и внешней среды трубопровода одинаковы, то для сварки материалов с различным значением КТР можно выбрать любую из схем.

4. При равных значениях КТР свариваемых материалов рекомендуется принимать вторую схему, так как при нагреве и охлаждении в соединениях материалов с одинаковым значением КТР остаточные напряжения отсутствуют. Внешняя обойма, изготовленная из материала с меньшим значением КТР, чем у соединяемых материалов, ограничит перемещение наружной поверхности всей сварной конструкции и позволит получить требуемое давление сварки на контактных поверхностях.

Каждый вариант технологической схемы диффузионной сварки переходников по охватываемым поверхностям представляет собой трехслойную конструкцию, собранную с определенным расположением слоев-деталей и слоя-обоймы. Согласно технологическим рекомендациям, приведенным в [5], на контактных поверхностях свариваемых деталей необходимо наличие малой конусности для облегчения процесса сборки. Контактную поверхность внутренней обоймы в первой схеме также будет целесообразно выполнить конусной, что обеспечит постоянный контакт поверхностей на всех этапах сварки.

Цель статьи – разработка математической модели, которая позволит решить задачу определения остаточных напряжений после температурной деформации упругопластического осесимметричного составного тела вращения, состоящего из трех слоев, контактные поверхности которых расположены под определенным углом.

Модель диффузионной сварки по охватываемым поверхностям. Конструкцию сварного соединения можно представить в виде осесимметричного составного тела вращения (рис. 1). Тип взаимодействия между слоями определяется функциональным назначением поверхностей при сварке. На контактных свариваемых поверхностях деталей в процессе сборки и нагревания рассматривается проскальзывание без трения; после охлаждения – слои сцеплены. На технологических поверхностях, контактируемых с внутренней или внешней обоймами, на всех этапах сварки поверхности проскальзывают без трения.

Поставленную задачу определения остаточных напряжений в трехслойном упругопластическом теле после его нагрева и охлаждения невозможно решить в аналитическом виде. Наиболее приемлемым методом для отыскания ее решения является вариационная формулировка задачи в рамках теории малых упругопластических

деформаций с последующей дискретизацией вариационной задачи методом конечных элементов.

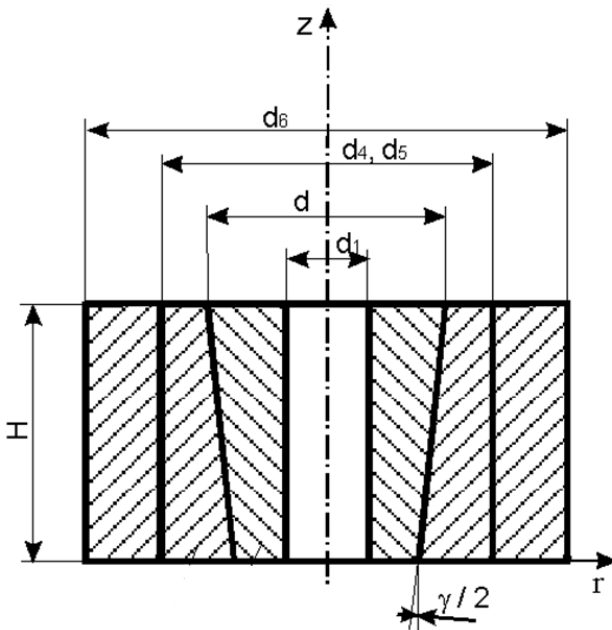


Рис. 1. Конструкция сварного соединения

Данный метод расчета реализован во многих программных комплексах, позволяющих выполнять линейный и нелинейный анализ с различным сочетанием действующих нагрузок, ограничений и контактных взаимодействий. Наиболее удобным является многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа Abaqus, в котором математическое моделирование диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям можно выполнить поэтапно в отдельном расчетном шаге. При этом необходимо назначить ограничения модели и условия взаимодействия между контактными поверхностями.

Во всех разработанных схемах диффузионной сварки соединений с охватываемыми поверхностями контакта обойма должна ограничивать перемещения поверхностей деталей в радиальном направлении, что предполагает ее более высокие характеристики жесткости по сравнению

со свариваемыми деталями. Следовательно, при моделировании обойма может выступать как абсолютно жесткое тело.

В среде Abaqus для математического моделирования и определения всех компонент напряжений и деформаций реализованы следующие шаги расчета:

1. Сборка конструкции методом запрессовки требуемой детали в ответную некоторым усилием P . На модель накладываются ограничения перемещения торца ответной детали вдоль оси соединения, а именно принимаются равными нулю. Взаимодействие между свариваемыми поверхностями – проскальзывание без трения.

2. Нагрев конструкции моделируется наложением однородного температурного поля, соответствующего температуре сварки, на все тело модели. Кроме уже имеющегося ограничения, для второй схемы сварки устанавливается перемещение наружной поверхности охватывающей детали равным нулю.

3. На этапе выдержки соединения при температуре сварки определяется поле напряжений и деформаций с учетом установившейся ползучести материалов деталей. В программном комплексе Abaqus расчет напряжений ползучести может выполняться по теории упрочнения, теории старения и закону гиперболического синуса. В рассматриваемой задаче для оценки напряжений ползучести целесообразно использовать теорию старения, как наиболее простой из законов, который не требует большого количества данных по константам материалов при достаточно высокой температуре сварки:

$$\dot{\varepsilon} = A \tilde{q}^n t^m, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – одноосные эквивалентные скорости деформации ползучести; A , n и m – константы материала при определенной температуре; \tilde{q} – одноосный эквивалентный девиатор напряжений; t – время.

4. Охлаждение конструкции до нормальной температуры моделируется наложением однородного температурного поля с температурой 293 К. В модели, составленной по первой схеме сварки перемещение внутренней поверхности охватываемой детали принимается равным нулю. Взаимодействие на контактных свариваемых поверхностях – жесткое сцепление слоев.

5. Моделирование эксплуатационных условий биметаллического переходника выполняется приложением на его внутренней поверхности давления с требуемым значением и температурного поля, соответствующего температуре рабочей среды.

В разработанной математической модели диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям расчет выполняется в упругопластической постановке с характеристиками материалов, зависящими от температуры.

Данная математическая модель использовалась для определения остаточных напряжений на каждом этапе диффузионной сварки биметаллического соединения из титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В дальнейшем из полученных биметаллических заготовок изготавливаются биметаллические переходники для соединения трубопровода из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с шаробаллоном из титанового сплава ВТ6С. Рабочая среда внутри трубопровода и переходника имеет пониженную температуру, следовательно, для осуществления процесса диффузионной сварки по охватываемым поверхностям необходима вторая конструктивная схема с внешней обоймой. При этом охватываемая деталь должна изготавливаться из титанового сплава ВТ6, как материала с меньшим КТР, а охватывающая – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Физико-механические и теплофизические характеристики свариваемых материалов при температуре сварки 1173 К определялись по данным из [7, 8] (табл. 1).

Константы материалов для расчета напряжений ползучести за время выдержки 600 с при температуре сварки приняты по данным работ [9, 10] (табл. 2).

Проведенные расчеты показали, что после этапа запрессовки усилием 5 МПа напряжения на контактных поверхностях не превышают предела текучести обоих материалов (рис. 2), что обеспечит формирование физического контакта за счет микропластической деформации без значительного деформирования деталей в объеме.

Нагревание собранного соединения ВТ6-12Х18Н10Т до температуры сварки 1173 К приводит к появлению высокого уровня сжимающих напряжений в конструкции и интенсивности напряжений Мизеса (рис. 3), превышающих пределы текучести обоих материалов (табл. 1) по всему сечению деталей. Совокупность полученных условий при температуре сварки обеспечит требуемое контактное давление, которое будет превышать рекомендуемое 5 МПа для торцевой сварки биметаллических соединений ВТ6-12Х18Н10Т и обеспечит дальнейшее формирование физического контакта на соединяемых поверхностях деталей с интенсификацией процессов диффузии. Выдержка соединения при температуре сварки в течении 10 мин приводит к уменьшению давления на контактных свариваемых поверхностях практически до нуля (рис. 4), что объясняется высокой интенсивностью процессов ползучести

и релаксации в материалах деталей с заданными константами установившейся ползучести (табл. 2).

Таблица 1

Физико-механические и теплофизические свойства титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Характеристика материала	Титановый сплав ВТ6				Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т			
	293 К		1173 К		293 К		1173 К	
Модуль упругости, МПа	115000		66476		195200		0,285	
Коэффициент Пуассона	0,32		0,32		127870		0,353	
Коэффициент температурного расширения, 1/К	$8 \cdot 10^{-6}$		$1,22 \cdot 10^{-5}$		$1,6 \cdot 10^{-5}$		$1,93 \cdot 10^{-5}$	
Параметры диаграммы растяжения	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ
	475	0	150	0	237,5	0	75,1	0
	750	0,001	180	0,001	275	0,002	102,1	0,002
	925	0,002	260	0,002	300	0,005	107,7	0,005
	950	0,003	270	0,003	440	0,02	163,8	0,02
	950	0,004	270	0,02				
	962,5	0,005						
	950	0,01						
	950	0,02						

Таблица 2

Константы титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т для расчета напряжений ползучести

Характеристика материала	Титановый сплав ВТ6	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
	1173 К	1173 К
$A, (Н/мм^2) \cdot c^{-1}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-12}$
n	2	3,2
m для установившейся ползучести	0	0

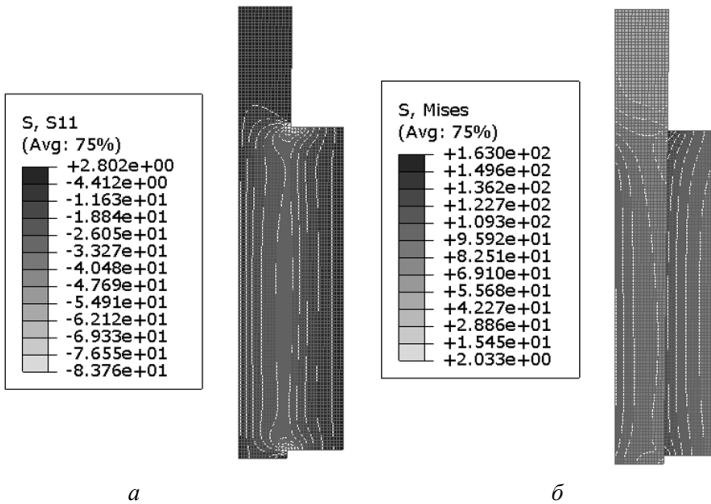


Рис. 2. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после запрессовки: а – радиальные напряжения, МПа; б – напряжения Мизеса, МПа

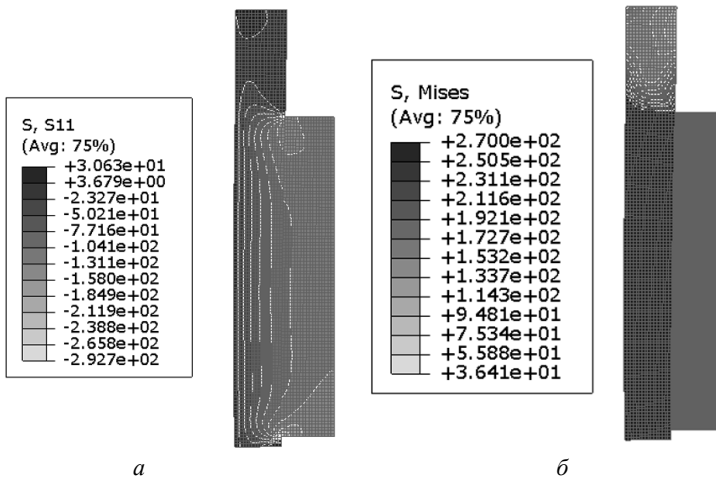


Рис. 3. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после нагревания: а – радиальные напряжения, МПа; б – напряжения Мизеса, МПа

После охлаждения конструкции до нормальной температуры в сварном соединении возникают остаточные сжимающие напряжения, интенсивность которых по теории Мизеса превышает предел текучести нержавеющей стали 12X18H10T по всему сечению наружной детали. При этом интенсивность напряжений по сечению детали, изготовленной из титанового сплава ВТ6, ниже значения предела текучести и достигает максимальной величины на внутренней поверхности и минимальной – на внешней контактной (рис. 5). Расчетное распределение интенсивности напряжений по сечению конструкции показало, что при нормальной температуре внутренняя деталь из титанового сплава ВТ6 будет деформироваться упруго, а наружная – из нержавеющей стали 12X18H10T, вполне пластически. Величина касательных напряжений на контактных поверхностях (рис. 5, в) не превышает предела текучести материалов свариваемых деталей и не приведут к снижению прочности соединения или его разрушению.

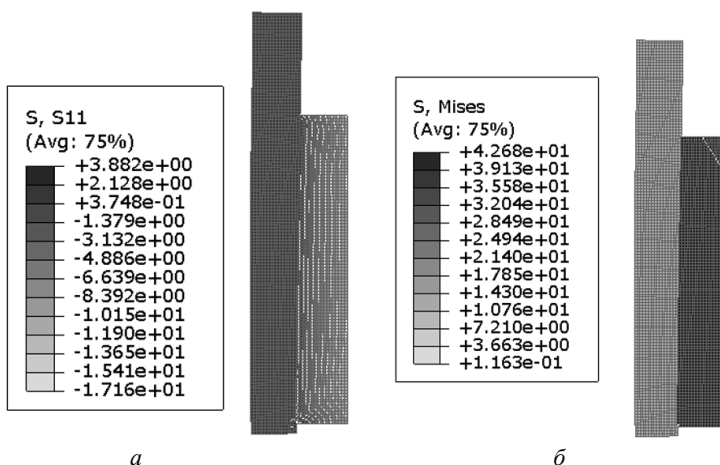


Рис. 4. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после выдержки 10 мин: а – радиальные напряжения, МПа; б – напряжения Мизеса, МПа

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что на всех этапах диффузионной сварки биметаллического соединения по охватываемым поверхностям из титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т обеспечиваются условия образования физического контакта и диффузии на свариваемых поверхностях. Это подтверждает

правильность выбранной схемы диффузионной сварки для соединения ВТ6-12Х18Н10Т.

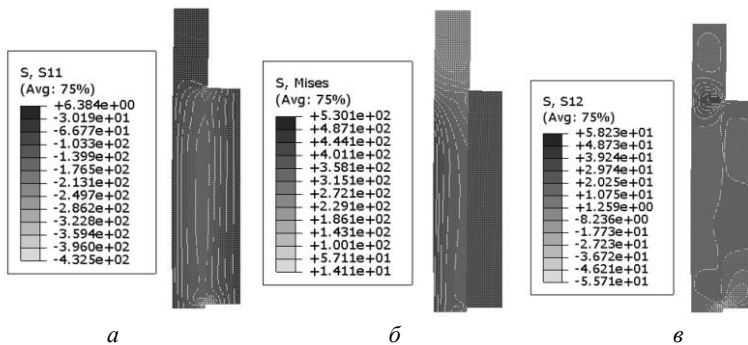


Рис. 5. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после охлаждения до нормальной температуры: *a* – радиальные напряжения, МПа; *б* – напряжения Мизеса, МПа; *в* – касательные напряжения, МПа

На основе проведенных исследований разработана методика проектирования и расчета биметаллических переходников с охватываемыми поверхностями контакта, получаемых методом диффузионной сварки:

1. Определение физико-механических и теплофизических свойств соединяемых материалов при температуре сварки.
2. Определение констант свариваемых материалов для степенной зависимости установившейся ползучести при температурах близких к температуре сварки.
3. Определение конструктивной схемы сварки в зависимости от теплофизических характеристик свариваемых материалов.
4. Построение математической модели в программном комплексе Abaqus с ограничениями и контактными взаимодействиями, зависящими от схемы диффузионной сварки.
5. Расчет полей деформаций и напряжений на каждом этапе сварки с целью выявления уровня пластической деформации свариваемых деталей, что особенно важно на этапе нагрева, когда хотя бы одна из соединяемых поверхностей должна быть в пластическом состоянии.

Выводы. В результате проделанной работы была предложена методика, которая может использоваться для разработки технологии диффузионной сварки биметаллических соединений по охватываемым поверхностям с различным сочетанием материалов. По результатам

расчетов также могут быть определены диапазоны геометрических параметров свариваемых деталей для обеспечения оптимальных условий формирования соединения.

Список литературы: 1. Киселев С.Н. Соединение труб из разнородных материалов / С.Н. Киселев, Г.Н. Шевелев, В.В. Роцин. – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с. 2. Диффузионная сварка материалов: справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с. 3. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением / Э.С. Каракозов. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с. 4. Карпович Е.В. Формирование зоны соединения при изготовлении переходников с развитыми поверхностями контакта / Е.В. Карпович // Вісник Дніпропетровського університету: Ракетно-космічна техніка. – 2000. – Вип. 4. – С. 76-80. 5. Чернецкий С.А. Математическое моделирование процесса диффузионной сварки соединений с развитыми поверхностями контакта / С.А. Чернецкий, Е.В. Карпович // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 150-158. 6. Чернецки, С.А. Математическое моделирование термонапряженных процессов в многослойных осесимметричных конструкциях / С.А. Чернецкий, Е.В. Карпович // Вісник Дніпропетровського університету. – 2008. – Т. 16. – № 4. – С. 185-188. 7. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / Под ред. Б.Е. Неймарка. – Л.: Энергия, 1967. – 240 с. 8. Безухов Н.И. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Н.И. Безухов, В.Л. Бажанов, И.И. Гольденבלата, под общ. ред. И.И. Гольденבלата. – М.: Машиностроение, 1965. – 568 с. 9. Локощенко А.М. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении / А.М. Локощенко, С.А. Шестериков // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 3. – С. 155-159. 10. Зунг Н.С. Моделирование технологических процессов сверхпластической формовки оболочек из двухфазных титановых сплавов: дис. канд. техн. наук: 05.13.05, защищена 01.10.14 / Нгуен Суан Зунг. – М., 2014. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kiselev S.N. Soedinenie trub iz raznorodnyh materialov / S.N. Kiselev, G.N. Shevelev, V.V. Roshhin. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 176 s. 2. Diffuzionnaja svarka materialov: spravochnik / Pod red. N.F. Kazakova. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 271 s. 3. Karakozov Je. S. Svarka metallov davleniem / Je. S. Karakozov. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 280 s. 4. Karpovich E.V. Formirovanie zony soedinenija pri izgotovlenii perehodnikov s razvitymi poverhnostjami kontakta / E.V. Karpovich // Visnik Dnipropetrovskogo universitetu: Raketno-kosmichna tehnika. – 2000. – Vip. 4. – S. 76-80. 5. Chereckij S.A. Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnoj svarki soedinenij s razvitymi poverhnostjami kontakta / S.A. Chereckij, E.V. Karpovich // Kosmichna nauka i tehnologija. – 2003. – T. 9. – № 1. – S. 150-158. 6. Chereckij S.A. Matematicheskoe modelirovanie termonaprjazhennyh processov v mnogoslojnyh osesimmetrichnyh konstrukcijah / S.A. Chereckij, E.V. Karpovich // Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. – 2008. – T. 16. – № 4. – S. 185-188. 7. Fizicheskie svojstva stalej i splovov, primenjaemyh v jenergetike: spravochnik / Pod red. B.E. Nejmarka. – L.: Jenergija, 1967. – 240 s. 8. Bezuhov N.I. Raschet na prochnost', ustojchivost' i kolebanija v uslovijah vysokih temperatur / N.I. Bezuhov, V.L. Bazhanov, I.I. Gol'denblat, pod obshh. red. I.I. Gol'denblata. – M.: Mashinostroenie, 1965. – 568 s. 9. Lokoshhenko A.M. Metodika opisanija polzuchesti i dlitel'noj prochnosti pri chistom rastjazhenii / A.M. Lokoshhenko, S.A. Shesterikov // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. – 1980. – № 3. – S. 155-159. 10. Zung N.S. Modelirovanie tehnologičeskikh processov sverhplastičeskoj formovki oboloček iz dvuhfaznyh titanovyh splovov: dis. kand. tehn. nauk: 05.13.05, zashhishhena 01.10.14 / Nguen Suan Zung. – M., 2014. – 184 s.

Поступила (received) 30.11.2014

*Статью представил д-р техн. наук, профессор Днепропетровского
национального университета имени Олеся Гончара Санин А.Ф.*

Karpovych Elena, Cand.Tech.Sci.
Dnipropetrovsk National University
Str. Zelena, 1/147, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49102
Tel.: (095) 4243054, e-mail: kelv@ua.fm
ORCID ID: 0000-0002-0677-5822

Karpovych Ivan, Senior Lecturer
Dnipropetrovsk National University
Str. Zelena, 1/147, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49102
Tel.: (050) 5675101, e-mail: ivkarp70@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-3633-8532