

# ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА И ПАЙКА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УПРАВЛЯЕМЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ

В. В. КВАСНИЦКИЙ<sup>1</sup>, В. Ф. КВАСНИЦКИЙ<sup>2</sup>, CHEN HEXING<sup>3</sup>, М. В. МАТВИЕНКО<sup>2</sup>, Г. В. ЕРМОЛАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

<sup>2</sup>Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

<sup>3</sup>Guangdong Academy of Sciences. No.9, Building, 100 Xianlie Rd. Guangzhou, P. R. China.

E-mail: chenhexing@gdas.gd.cn

Исследовано напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке в вакууме и пайке разнородных материалов с учетом пластических деформаций мгновенной пластичности и ползучести. Рассмотрена роль пластических деформаций в формировании соединений и остаточных напряжений при диффузионной сварке в вакууме разнородных металлов, в том числе металлов с неметаллами, а также однородных материалов с промежуточными прослойками. Применение температурного нагружения совместно с внешней нагрузкой при диффузионной сварке в вакууме разнородных металлов позволяет создать в стыке объемное напряженное состояние с формированием осевых, радиальных, окружных, касательных напряжений, способствующее локализации пластических деформаций в зоне стыка и развитию деформаций сдвига, а соответственно интенсификации процессов образования физического контакта, активации поверхностей и развитию диффузионных процессов. Управление напряженно-деформированным состоянием при соединении металлов с неметаллами позволяет регулировать релаксационные процессы при охлаждении и предотвратить разрушение соединений. Библиогр. 12, рис. 9.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, пайка, напряжения, деформации, моделирование, структура, механические свойства, диффузия

Изготовление деталей и узлов из разнородных материалов позволяет повысить эффективность машин, устройств и новой техники, так как при этом сочетаются различные свойства материалов, которые нельзя обеспечить в однородных конструкциях. Номенклатура материалов, которые используются в комбинированных конструкциях, весьма разнообразна. Созданы новые материалы, например, композиционные, получаемые методами порошковой металлургии, жаропрочные никелевые литейные суперсплавы, интерметаллидные материалы и другие, которые не допускают нагрева до температуры плавления. В таких случаях используют сварку в твердом состоянии, например, диффузионную сварку в вакууме (ДСВ), сварку трением и другие [1]. При соединении металлов с неметаллами часто используют также пайку, но проблемы, связанные с различием физико-механических свойств (ФМС) соединяемых материалов и возникновением остаточных напряжений (ОН), остаются [2, 3].

Проблемой при ДСВ разнородных материалов является неравномерность распределения пластических деформаций по площади стыка, а соответственно и процессов образования физического контакта, активации поверхностей и объемного взаимодействия (диффузии, рекристаллизации).

В работе [3] нами показано, что одним из перспективных способов управления напряженно-деформированным состоянием (НДС) и распределения пластических деформаций является ДСВ с термоциклированием.

Целью настоящей работы было усовершенствование технологии ДСВ и пайки разнородных материалов путем управления формированием НДС с учетом пластических деформаций. Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости рассмотрена в работе [4].

Для установления принципиальной возможности управления формированием пластических деформаций в зоне стыка разнородных материалов и его закономерностей при ДСВ с термоциклированием проведено моделирование НДС в наиболее распространенных узлах типа цилиндр-цилиндр (Ц-Ц), втулка-втулка (В-В) и втулка-фланец (В-Ф) при нагреве и охлаждении на 100 °С. Для моделирования НДС использовали метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS. Адекватность результатов моделирования подтверждена аналитическими решениями и данными, полученными экспериментально методом спекл-интерферометрии, описанными в работе

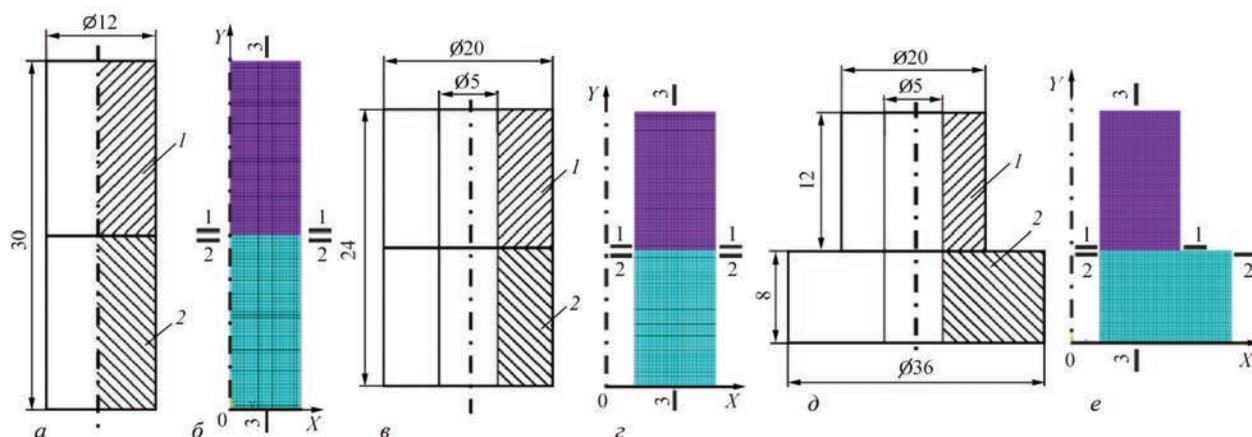


Рис. 1. Общий вид (*a, в, д*) и сечение конечно-элементных моделей (*б, г, е*) узлов Ц-Ц, В-В и В-Ф, соответственно

[5]. Общий вид и сечения конечно-элементных моделей узлов Ц-Ц, В-В и В-Ф приведены на рис. 1.

Моделирование НДС узлов с учетом пластических деформаций мгновенной пластичности показали, что принципиальные закономерности формирования НДС цилиндрических узлов, установленные в работах [3, 4] для упругого состояния, сохраняются, но уровень напряжений существенно снижается. При моделировании модули упругости принимали одинаковыми, предел текучести в узлах Ц-Ц и В-В меньше в детали 1, в узле В-Ф пределы текучести как одинаковые, так и меньше у втулки или меньше у фланца. Температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) приняты отличающимися в два раза, кроме модели для ДСВ по традиционной схеме (при постоянной температуре) при разных пределах текучести.

Установлено, что при традиционной схеме ДСВ узлов Ц-Ц и В-В в материале с меньшим пределом текучести в момент появления пластических деформаций в зоне стыка эквивалентные напряжения уменьшаются и при дальнейшем нагружении пластически деформируется часть детали, удаленная от стыка (рис. 2, *a, б*). Стык на рис. 2, *a, б* показан стрелочкой. В узле В-Ф при одинаковых пределах текучести и меньшим у

втулки поля деформаций аналогичны полям в узлах Ц-Ц и В-В с заметным увеличением у концентратора напряжений (рис. 2, *в, г*). При меньшем пределе текучести материала фланца пластические деформации в нем развиваются в очень узкой зоне вблизи концентратора (точка А, рис. 2, *д*).

Моделирование с учетом пластических деформаций ползучести показало, что характер полей деформаций не изменяется. При традиционной схеме ДСВ пластические деформации на большей части стыка также отсутствуют. При ДСВ с термоциклированием (нагрев или охлаждение на 100 °С) без внешнего нагружения сжатием после схватывания поверхностей узлов Ц-Ц и В-В из материалов с равными пределами текучести и разными ТКЛР обеспечивается идеальная локализация пластических деформаций в зоне соединения с захватом обоих соединяемых материалов симметрично относительно стыка (рис. 3, *a–г*). В узле В-Ф при одинаковых пределах текучести материалов втулки и фланца поля деформаций не симметричны (рис. 3, *д, е*). И при нагреве, и при охлаждении они сосредоточены вблизи стыка, в большей степени со стороны втулки. Зона пластических деформаций со стороны фланца значительно меньше. Появление пластических дефор-

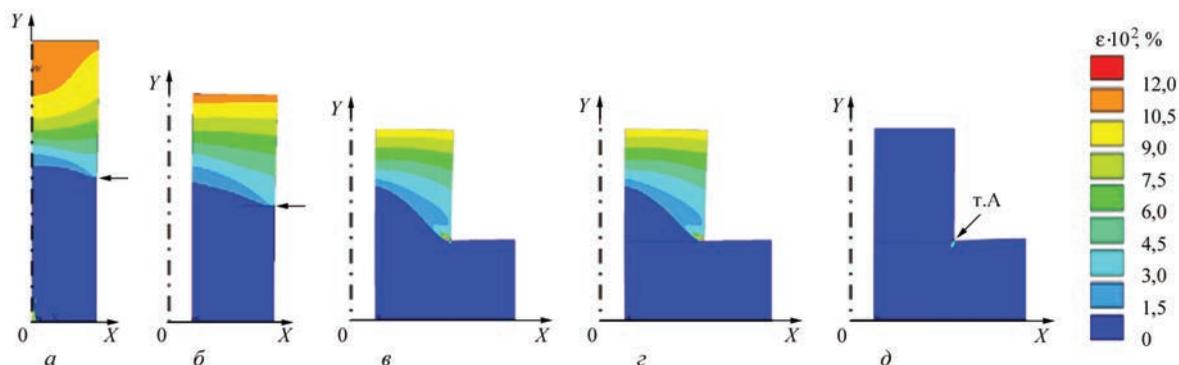


Рис. 2. Поля мгновенных пластических деформаций узлов Ц-Ц (*a*), В-В (*б*) при меньшем пределе текучести детали 1, В-Ф при равных пределах текучести (*в*), меньшим у втулки (*г*) и меньшим у фланца (*д*) при традиционной схеме ДСВ с учетом деформаций мгновенной пластичности

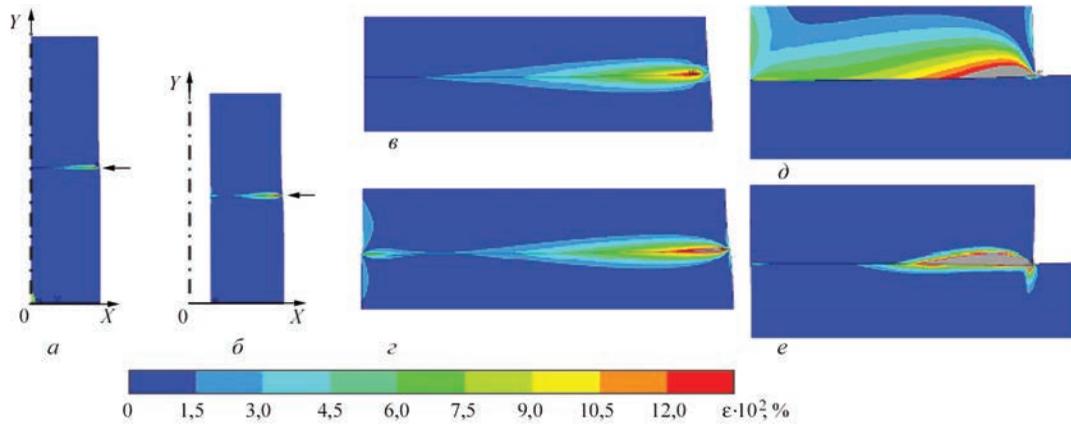


Рис. 3. Поля эквивалентных мгновенных пластических деформаций в узлах Ц-Ц (*а, в*), В-В (*б, г*) и В-Ф (*д, е*) с одинаковыми пределами текучести и меньшим ТКЛР деталей *1* и втулки по всему узлу (*а, б*) и втулки по всему узлу (*в–е*) при термическом нагружении без внешнего давления после схватывания поверхностей

маций уменьшает пики всех напряжений в точке концентрации.

При одновременном силовом (сжатии) и термическом (нагрев–охлаждение) нагружении и равных пределах текучести пластические деформации увеличиваются во всех узлах и распределяются более равномерно в узлах В-Ф. В узлах Ц-Ц и В-В они появляются поочередно в материале с меньшим ТКЛР при нагреве и с большим ТКЛР при охлаждении. Если пределы текучести разные, то в условиях моделирования при нагреве деформировался только материал с меньшим пределом текучести и меньшим ТКЛР.

Особенностью полей и эпюр распределения пластических деформаций при термоциклировании как без внешнего давления, так и с давлением является наличие в стыке зоны, где эквивалентные напряжения и пластические деформации имеют минимальное значение, а касательные напряжения и деформации сдвига переходят через нуль. Точку с нулевыми касательными напряжениями и окружающую зону вблизи нее с минимальными эквивалентными напряжениями и деформациями предложено называть точкой и зоной деформационного застоя. Отсутствие деформаций сдвига усложняет возможность активации соединяемых поверхностей. В узле Ц-Ц эта зона находится в его центре, в узлах В-В и В-Ф — вблизи внутренней поверхности на расстоянии около 0,23...0,25 толщины втулки. От этой зоны к внутренней и внешней поверхности пластические деформации постепенно увеличиваются.

Для расширения возможностей регулирования НДС исследовали влияние пластических деформаций ползучести. Это было третьим этапом моделирования НДС (первый этап для упругого состояния, второй этап с учетом деформаций мгновенной пластичности). При этом рассматривали три цикла нагрева и охлаждения на 100 °С в течение 60 с с выдержкой 60 с в каждом цикле

при давлении сжатия 15 МПа. Величина и распределение пластических деформаций после каждого цикла показаны на рис. 4.

В процессе термоциклирования напряжения и пластические деформации изменяются по величине, но характер распределения вдоль стыка сохраняется. Ползучесть материала увеличивает значение пластических деформаций, что способствует образованию физического контакта, акти-

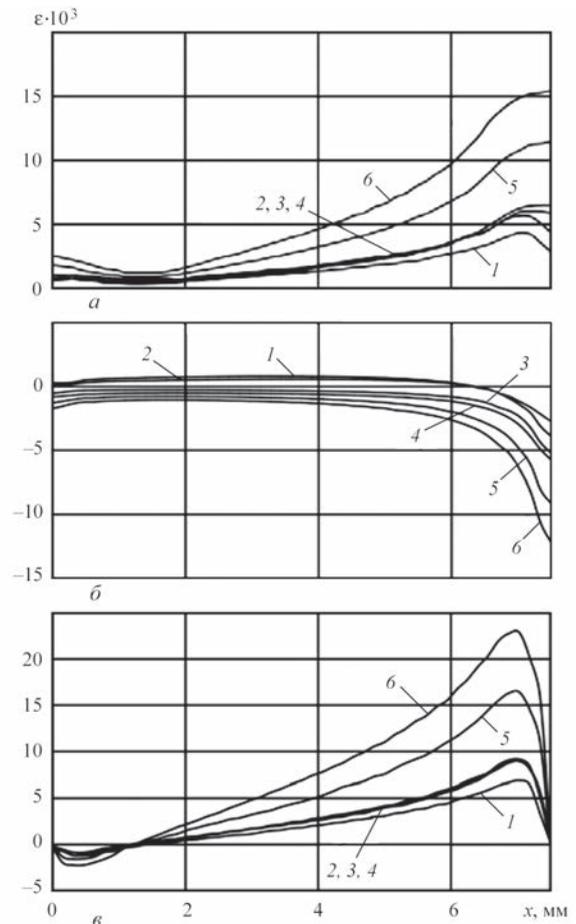


Рис. 4. Эпюры эквивалентных (*а*), осевых (*б*) и сдвиговых (*в*) деформаций при ДСВ через 60 (*1*), 120 (*2*), 180 (*3*), 240 (*4*), 480 (*5*) и 720 с (*6*) после начала термоциклирования узла В-В

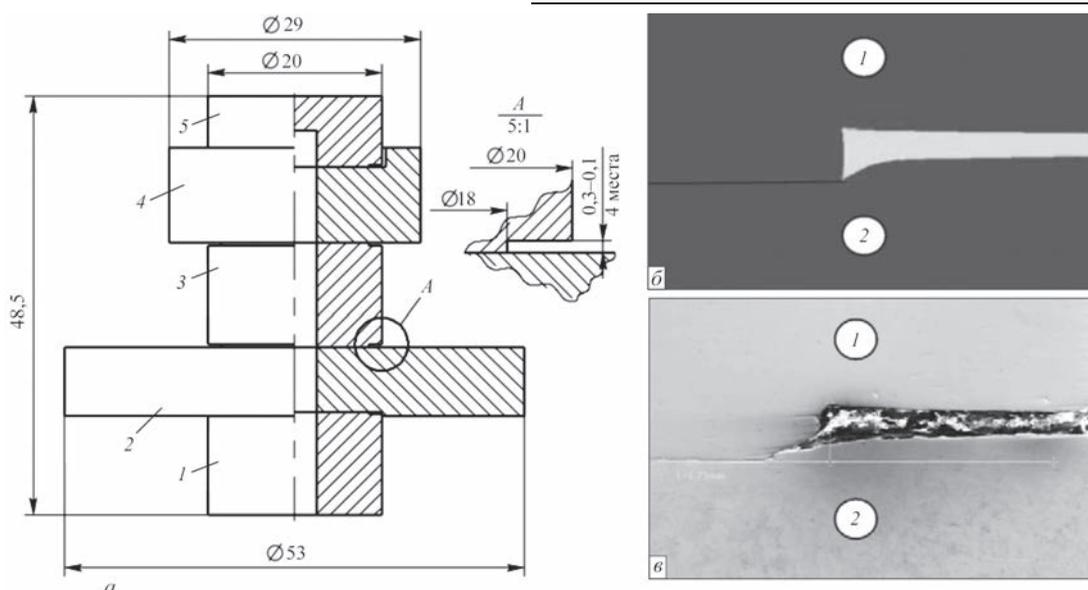


Рис. 5. Сварная заготовка корпуса электромагнитного клапана (а) и характер деформирования заготовки после ДСВ в узле А соединения втулки 1 и фланца 2 по результатам моделирования (б) и фактически (в): 1, 3, 5 — сталь 12Х18Н10Т; 2, 4 — сталь 10895

вации соединяемых поверхностей и развитию рекристаллизационных и диффузионных процессов, в отличие от традиционной схемы ДСВ, в условиях которой главную роль играют медленно протекающие диффузионные процессы [6]. ДСВ в условиях совместного сжатия и наложения теплосмен является более благоприятной для распределения пластических деформаций, обеспечивая их локализацию в зоне стыка, более равномерное распределение по площади соединения и интенсивное развитие процессов образования соединения.

Моделирование НДС было использовано при разработке технологии ДСВ корпусов электромагнитных клапанов, в которых свариваются одновременно четыре стыка сталей 12Х18Н10Т (три детали) и 10895 (две детали). Сварная заготовка клапана показана на рис. 5.

Сварка проводилась при общем нагреве токами высокой частоты при трех циклах нагрева и охлаждения. Как и было установлено предварительными исследованиями на моделях, деформация проходила только при нагреве в зоне стыка менее

прочной стали 10895. После ДСВ проводили обмеры и анализ результатов моделирования.

Для проведения моделирования НДС были определены модули упругости, пределы текучести, коэффициенты Пуассона, дилатограммы нагрева и охлаждения, кривые, параметры и уравнения ползучести соединяемых материалов в функции от температуры. Сталь 10895 при нагреве переходит из  $\alpha$ -фазы в  $\gamma$ -фазу с изменением физико-механических свойств (ФМС), в частности, изменением ТКЛР, о чем свидетельствуют дилатограммы нагрева и охлаждения стали 10895, а также ТКЛР этой же стали (рис. 6). Это позволило в процессе термоциклирования использовать не только температурные, но и структурные деформации.

Зависимость предела текучести от температуры, использованная при моделировании, и кривые ползучести стали 10895 приведены на рис. 7. В интервале термоциклирования 750...1050 °С скорость ползучести стали 12Х18Н10Т очень мала по сравнению со сталью 10895 и ее деформацией можно пренебречь.

Параметры ползучести стали 10895 определяли экспериментально с применением установки Gleeble-3800 и модернизированной установки для диффузионной сварки в вакууме. Для обработки результатов использовали уравнение, описывающее ползучесть на первой и второй стадиях:

$$\varepsilon = C_1 p^{C_2} \frac{t^{C_3+1}}{C_3+1} \times \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right) + C_5 p^{C_6} t \exp\left(-\frac{C_7}{T}\right),$$

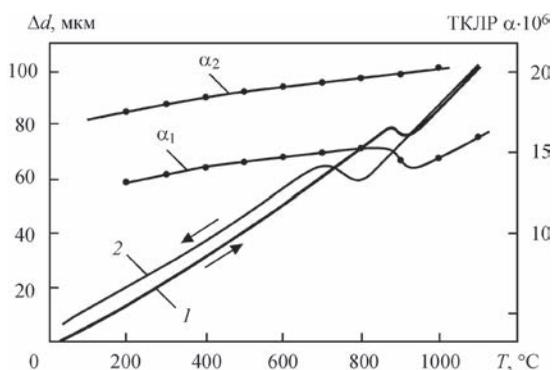


Рис. 6. Дилатограммы нагрева (1) и охлаждения (2) стали 10895 и ТКЛР стали 10895 ( $\alpha_1$ ) и стали 12Х18Н10Т ( $\alpha_2$ )

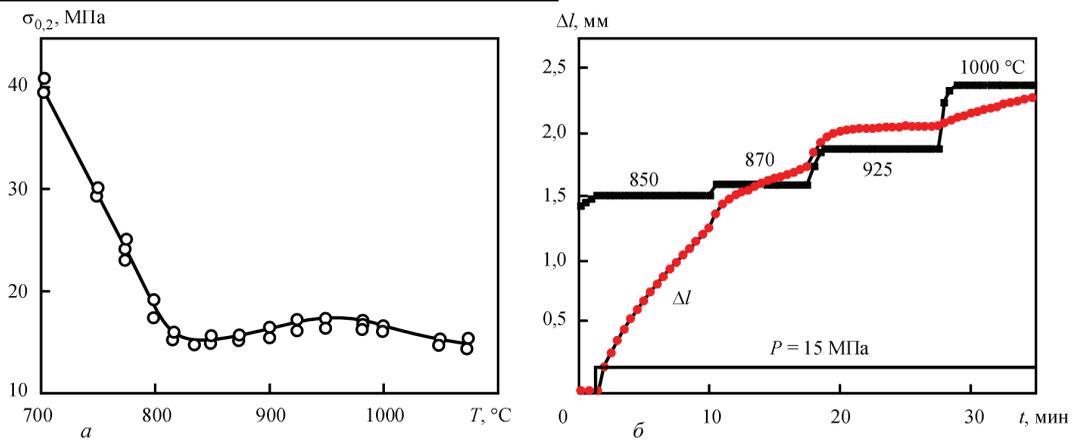


Рис. 7. Влияние температуры на предел текучести (а) и циклограмма испытаний на ползучесть стали 10895 с изменением длины образца  $\Delta l$  при температурах 850, 870, 925, 1000 °С и давлении 15 МПа (б)

где  $\varepsilon$  — величина деформации;  $C_1 \dots C_7$  — коэффициенты, определяемые по экспериментальным кривым ползучести, при этом  $C_1 > 0$ ;  $C_3 < 0$ ;  $C_5 > 0$ ;  $C_4 = (\Delta H_{n(1)}/R)$ ;  $C_7 = (\Delta H_{n(2)}/R)$ ;  $\Delta H_{n(1)}$  и  $\Delta H_{n(2)}$  — энергия активации ползучести на первой и второй стадиях, соответственно;  $C_2$  и  $C_6$  — постоянные, соответственно для первой и второй стадий.

Коэффициенты определены из серии кривых, полученных для разных температур и давлений:  $C_1 = 4,99 \cdot 10^{-24}$ ;  $C_2 = 4,59 \dots 4,65$ ;  $C_3 = -0,32 \dots -0,52$ ;  $C_4 = 32700 \dots 39800$ ;  $C_5 = 1,641 \cdot 10^{-25}$ ;  $C_6 = 4,49 \dots 4,65$ ;  $C_7 = 32700 \dots 39800$ .

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных результатов подтвердило адекватность моделирования. Например, на рис. 5, а показана конфигурация заготовки в зоне соединения втулки 3 с фланцем 2 в узле А (см. рис. 5, б, в). Характер деформирования заготовки при моделировании и в реальной детали одинаковы, а количественные значения деформаций имеют удовлетворительную сходимость.

Для экспериментальной оценки влияния термоциклирования на качество сварных соединений проводили также механические испытания. Установлено, что при сварке без термоциклирования образцы при испытаниях на растяжение разрушились при напряжениях до 255 МПа. Поверхность разрушения имела до 40 % площади «слипания», а также форму воронки, что свидетельствует о начале разрушения в центре образца. При сварке с термоциклированием достаточно трех термоциклов для обеспечения равнопрочности соединений со сталью 10895 (более 360 МПа). При испытаниях на ударный изгиб цилиндрические образцы диаметром 15 мм при угле загиба 90° не разрушались. При испытании образцов, имитирующих изделие, разрушение проходило по стали 10895 и напряжениях (363...398)/383 МПа (в знаменателе среднее значение).

Для изучения структуры металла в зоне стыка использовали метод электронного просвечивания фольги при увеличениях до 50000 и локальный рент-

геноспектральный микроанализ с определением тонкой структуры, диффузионных процессов и распределения плотности дислокаций по площади стыка, которая обусловлена значением и интенсивностью пластических деформаций. Результаты этих исследований приведены в работах [1, 7, 8]. Ширина диффузионной зоны даже в центре цилиндра, определяемая по распределению хрома, никеля и железа, составила около 10 мкм, что существенно превышает принятый в литературе критерий прочности по ширине диффузионной зоны 3...5 мкм [6]. При стендовых испытаниях изделия разрушались с многократным запасом нормативной прочности. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность использования не только температурных, но и структурных деформаций для управления формированием НДС в процессе сварки. Структурные деформации использованы также при ДСВ дисперсионноупрочняющих жаропрочных никелевых сплавов для соединения деталей, одна из которых находилась в аустенизированном, другая в состаренном состоянии, а термоциклирование проводили в температурном интервале 1000...1175 °С, в котором происходит выпадение и растворение упрочняющей фазы и, как следствие, изменение удельного объема (структурные деформации), что способствует развитию в стыке пластических деформаций.

Главной проблемой создания металлокерамических узлов является формирование остаточного НДС, связанного с различием ФМС металла и керамики. При этом определяющую роль играют конструкция узла и процессы релаксации напряжений, которые возникают даже в согласованных спаях при высокотемпературной пайке. Моделирование НДС позволило создать металлокерамические узлы без металлизации керамики с применением высокотемпературной пайки (рис. 8).

Определены оптимальная толщина ковара, наиболее опасные зоны соединения, влияние деформаций мгновенной пластичности и ползучести



Рис. 8. Металлокерамические узлы, полученные высокотемпературной пайкой без металлизации керамики

на снижение уровня остаточных напряжений до безопасного и режим охлаждения. Аналогичные проблемы решены при создании металлографитовых конструкций [9, 10].

При пайке металлов с неметаллами, жаропрочных никелевых сплавов или других однородных материалов мы имеем соединение с промежуточной прослойкой, свойства и толщина которой также влияют на НДС и работоспособность узла.

Известно, что НДС влияет на механические свойства материала, его прочность (предел текучести) и пластичность (относительное удлинение) [11]. Для оценки этого влияния на свойства соединяемых материалов и прослойки в зоне соединения удобно использовать коэффициент жесткости напряженного состояния  $K_{ж}$ , равный отношению максимальных по модулю главных напряжений к эквивалентным,  $K_{ж} = \sigma_{1(3)}/\sigma_{эkv}$ . Величина коэффициента  $K_{ж}$  определяет степень разупрочнения ( $K_{ж} < 1$ ) или упрочнения ( $K_{ж} > 1$ ) материала в той или иной зоне узла по сравнению с линейным напряженным состоянием, в условиях которого проводятся стандартные испытания материалов на прочность. Прослойки разделяют на «жесткие» и «мягкие». В пластической стадии работы к мягким относятся прослойки с меньшим пределом текучести  $\sigma_{т пр}$ , чем у основного металла ( $\sigma_{т пр} < \sigma_{т о.м}$ ), к жестким прослойки с большим  $\sigma_{т пр}$  ( $\sigma_{т пр} > \sigma_{т о.м}$ ). При работе в упругой стадии критерием жесткости являются модули упругости: мягкие при  $E_{пр} < E_{о.м}$ , жесткие при  $E_{пр} > E_{о.м}$ .

Компьютерное моделирование НДС цилиндрических узлов с прослойками на растяжение и сжатие показало, что как при жесткой, так и при мягкой прослойках в небольшой зоне их соединения с основным металлом вблизи поверх-

ности в прослойке и прилегающих участках основного металла шириной около двух толщин прослойки формируется объемное НДС с радиальными, окружными, осевыми и касательными напряжениями.

При растяжении в мягкой прослойке, которая начнет деформироваться раньше основного металла, действуют растягивающие радиальные, окружные и осевые напряжения, в то время как в более прочном основном металле — растягивающие осевые и сжимающие радиальные и окружные. При этом уровень эквивалентных напряжений в прослойке снижается по сравнению с приложенной нагрузкой, а в основном металле возрастает, т. е. проявляется эффект разгрузки или упрочнения прослойки и догрузки или разупрочнения основного металла [12].

В узлах с жесткой прослойкой осевое растяжение в ней сочетается со сжатием в радиальном и окружном направлениях. При этом эквивалентные напряжения в прослойке возрастают, т. е. проявляется эффект догрузки прослойки или ее разупрочнения [12]. Поэтому хрупкие прослойки в паяных соединениях не допускаются.

Компьютерное моделирование показало, что в упругой стадии деформирования мягкой прослойки коэффициенты жесткости напряженного состояния и соответственно упрочнение мягкой прослойки и разупрочнение более прочного основного металла зависят только от соотношения модулей упругости и коэффициентов Пуассона основного металла и прослойки и не зависят от величины приложенной осевой нагрузки. В пластической стадии они зависят также от степени перегрузки прослойки, т. е. отношения приложенного напряжения к пределу текучести материала прослойки:  $K_{пер} = \sigma_{нагр}/\sigma_{т}$ , где  $K_{пер}$  — коэффициент перегрузки прослойки,  $\sigma_{нагр}$  — действующая нагрузка на узел,  $\sigma_{т}$  — предел текучести материала прослойки.

Вблизи образующей узла равномерность распределения напряжений резко нарушается. Эпюры осевых напряжений вдоль внешней поверхности в зоне стыка прослойки и основного металла при различных осевых нагрузках в упругой стадии показаны на рис. 9, а, а в упругопластической на рис. 9, б.

Осевые напряжения вблизи стыка распределены неравномерно. В упругой стадии работы прослойки они изменяются от 70 до 120 МПа в прослойке и от 100 до 175 МПа в основном металле, а в упругопластической от 90 до 120 МПа в прослойке и от 140 до 255 МПа в основном металле. Максимальные осевые напряжения существенно превышают уровень приложенной внешней нагрузки и находятся в основном металле рядом со стыком. Вследствие этого при достаточном упроч-

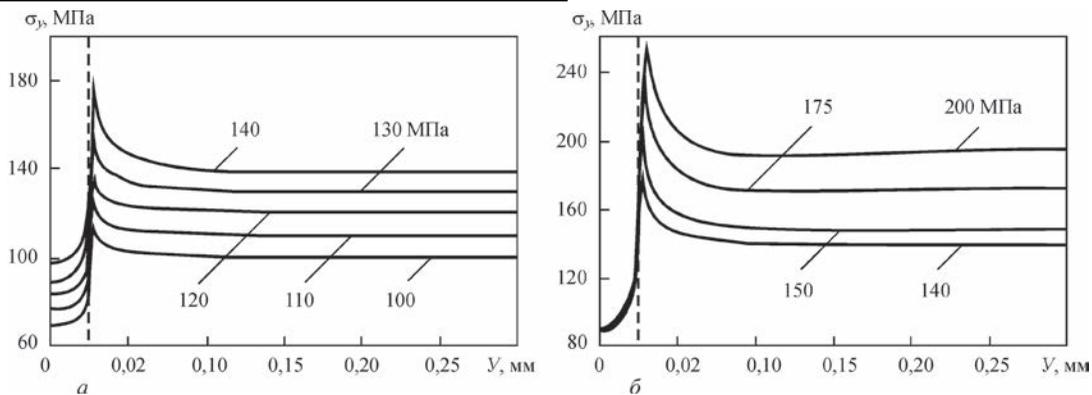


Рис. 9. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей в зоне стыка прослойки и основного металла при осевых нагрузках 100...130 МПа (а) и 140...200 МПа (б)

нении мягкой прослойки и разупрочнении основного металла разрушение может произойти по более прочному основному металлу на стыке с прослойкой, что подтверждается известными экспериментами по пайке армко-железа медью с толщиной медной прослойки около 0,05 мм [2].

### Выводы

1. При ДСВ с термоциклированием разнородных материалов вследствие появления радиальных, осевых, окружных и касательных напряжений формируется объемное напряженное состояние с развитием деформации сдвига, что обеспечивает локализацию пластических деформаций в зоне стыка, активацию соединяемых поверхностей и их активное взаимодействие по всей площади. Характер и уровень НДС в наибольшей мере определяются внешним давлением сжатия, различием ТКЛР, интервалом изменения температуры и структурными деформациями. Например, пластическая деформация локализуется в зоне стыка при ДСВ дисперсионно-упрочняемых жаропрочных никелевых сплавов, находящихся в состаренном и аустенизированном состояниях, переходах  $\alpha$ - в  $\gamma$ -фазу и других.

2. При высокотемпературной пайке неметаллизированной керамики с коваром деформации мгновенной пластичности в интервале высоких температур и ползучести при более низких температурах позволяют снизить остаточные напряжения в металлокерамических узлах ниже предела прочности керамики на разрыв. Релаксации напряжений способствует режим охлаждения под давлением.

3. В соединениях однородных металлов с мягкой прослойкой при нагружении осевой нагрузкой в зоне стыка формируется объемное НДС, изменяющее характеристики прочности и пластичности металла, полученные при испытаниях в условиях линейного напряженного состояния, что способствует появлению эффекта упрочнения металла прослойки и разупрочнению основного более прочного металла. Максимальные осевые напряжения возникают в основном металле рядом

со стыком, что в сочетании с разупрочнением может привести к разрушению соединения по более прочному основному металлу.

### Список литературы

1. Кривцун І. В., Квасницький В. В., Максимов С. Ю., Єрмолаєв Г. В. (2017) *Спеціальні способи зварювання*. Патон Б. С. (ред.). Миколаїв, НУК.
2. Єрмолаєв Г. В., Квасницький В. В., Квасницький В. Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Хорунов В. Ф., Квасницький В. Ф. (ред.). Миколаїв, НУК.
3. Махненко В. І., Квасницький В. Ф. (2009) Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*, **8**, 1–16.
4. Квасницький В. В., Єрмолаєв Г. В., Матвієнко М. В. (2017) *Механіка з'єднань при дифузійній сварці, пайці та напыленні разнородних матеріалів в умовах уругості*. Николаєв, НУК.
5. Квасницький В. В., Золотий Ю. Г., Лабарткава А. В. и др. (2008) Экспериментальное исследование деформации сварного узла типа втулка-втулка из разнородных материалов. *Зб. наук. праць НУК*. Миколаїв, НУК, **4**, сс. 65–73.
6. Казаков Н. Ф. (1976) *Диффузионная сварка материалов*. Москва, Машиностроение.
7. Лобанов Л. М., Єрмолаєв Г. В., Квасницький В. В. та ін. (2016) *Напруження та деформації при зварюванні і паянні*. Лобанов Л. М. (ред.). Миколаїв, НУК.
8. Квасницький В. В., Квасницький В. Ф., Маркашова Л. І., Матвієнко М. В. (2014) Влияние напряженно-деформированного состояния на структуру и свойства соединений при диффузионной сварке разнородных металлов. *Автоматическая сварка*, **8**, 10–16.
9. Емельянов В. М., Квасницький В. В., Єрмолаєв Г. В. и др. (2009) Оптимизация конструкции металлографитовых подшипников скольжения на основе анализа остаточных напряжений в паяных узлах. *Вестник Херсонского национального технического университета*, **3**, сс. 42–46.
10. Ermolaev G. V., Martynenko V. A., Oleksenko S. V. et al. (2017) Effect of the Rigid interlayer Thickness on the Stress-Strain of Metal-Grafitе Assemblies Under Thermal Loading. *Strengs of Materiale*, May, **49**, **3**, pp. 422–428.
11. Копельман Л. А. (2010) *Основы теории прочности сварных конструкций*. Санкт-Петербург, Лань.
12. Квасницький В. В., Квасницький В. Ф., Dong Chunlin и др. (2018) Напряженно-деформированное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке. *Автоматическая сварка*, **4**, 7–13.

### References

1. Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Yu., Ermolayev, H.V. (2017) *Special methods of welding*. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].

2. Ermolayev, H.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials*. Ed. by V.F. Khorunov et al. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
3. Makhnenko, V.I., Kvasnitsky, V.F. (2009) Peculiarities of formation of stress-strain state in diffusion bonds between dissimilar materials. *The Paton Welding J.*, **8**, 7-11.
4. Kvasnytskyi, V.V., Ermolayev, H.V., Matvienko, M.V. (2017) *Mechanics of joints in diffusion welding, brazing and spraying of dissimilar materials under elasticity conditions*. Nikolaev, NUK [in Russian].
5. Kvasnitsky, V.V., Zolotoj, Yu.G., Labartkava, A.B. et al. (2008) Experimental investigation of deformation of welded assembly of bush-bush type from dissimilar materials: *Transact. NUK, Mykolaiv, NUK*, **4**, 65-73 [in Russian].
6. Kazakov, N.F. (1976) *Diffusion welding of materials*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Lobanov, L.M., Ermolayev, H.V., Kvasnytskyi, V.V. et al. (2016) *Stresses and strains in welding and brazing*. Ed. by L.M. Lobanov. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
8. Kvasnitsky, V.V., Kvasnitsky, V.F., Markashova, L.I., Matvienko, M.V. (2014) Effect of stress-strain state on structure and properties of joints in diffusion welding of dissimilar metals. *The Paton Welding J.*, **8**, 8-14.
9. Emelyanov, V.M., Kvasnytskyi, V.V., Ermolayev, H.V. et al. (2009) Optimization of structure of metal-graphite slide-bearings on the base of residual stresses analysis in brazed assemblies. *Vestnik Khersonsk. NTU. Kherson, KhNTU*, **3**, 42-46 [in Russian].
10. Ermolaev, G.B., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, May, **49(3)** 422-428.
11. Kopelman, L.A. (2010) *Principles of theory of strength of welded structures*. St.-Petersburg, Lan [in Russian].
12. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Dong Chunlin, Matvienko, M.V. et al. (2018) Stressed state of welded and brazed assemblies from similar materials with a soft interlayer under axial loading. *The Paton Welding J.*, **4**, 6-10.

## ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАЯННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З КЕРОВАНИМ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ

**В. В. КВАСНИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, В. Ф. КВАСНИЦЬКИЙ<sup>2</sup>, CHEN HEXING<sup>3</sup>, М. В. МАТВІЄНКО<sup>2</sup>, Г. В. ЄРМОЛАСЬ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м.Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 23. E-mail: kvas69@ukr.net

<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова.

54025, м.Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

<sup>3</sup>Guangdong Academy of Sciences. No.9, Building, 100 Xianlie Rd. Guangzhou, P. R. China.

E-mail: chenhexing@gdas.gd.cn

Досліджено напружено-деформований стан при дифузійному зварюванні у вакуумі і паянні різнорідних матеріалів з урахуванням пластичних деформацій миттєвої пластичності і повзучості. Розглянуто роль пластичних деформацій у формуванні з'єднань і залишкових напружень при дифузійному зварюванні у вакуумі різнорідних металів, в тому числі металів з неметалами, а також однорідних матеріалів з проміжними прошарками. Застосування температурного навантаження спільно з зовнішнім навантаженням при дифузійному зварюванні у вакуумі різнорідних металів дозволяє створити в стикі об'ємний напружений стан з формуванням осевих, радіальних, окружних, дотичних напружень, що сприяє локалізації пластичних деформацій в зоні стиків і розвитку деформацій зсуву, а відповідно інтенсифікації процесів утворення фізичного контакту, активації поверхонь і розвитку дифузійних процесів. Управління напружено-деформованим станом при з'єднанні металів з неметалами дозволяє регулювати релаксаційні процеси при охолодженні і запобігти руйнуванню з'єднань. Бібліогр. 12, рис. 9.

*Ключові слова*: дифузійне зварювання, паяння, напруження, деформації, моделювання, структура, механічні властивості, дифузія

## DIFFUSION WELDING AND BRAZING OF DISSIMILAR MATERIALS WITH CONTROLLED STRESS-STRAIN STATE

**V.V. KVASNITSKY<sup>1</sup>, V.F. KVASNITSKY<sup>2</sup>, CHEN HEXING<sup>3</sup>, M.V. MATVIENKO<sup>2</sup>, G.V. ERMOLAYEV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>NTTU «Igor Sikorskii Kiev Polytechnic Institute». 37 Pobedi, 03056, Kiev, Ukraine. E-mail: kvas69@ukr.net

<sup>2</sup>Adm. Makarov National Shipbuilding University 9 Heroev Ukraini Prosp., 54025, Nikolaev, Ukraine.

E-mail: welding@nuos.edu.ua

<sup>3</sup>Guangdong Academy of Sciences. No.9, Building, 100 Xianlie Rd. Guangzhou, P. R. China.

E-mail: chenhexing@gdas.gd.cn

Stress-strain state in vacuum diffusion welding and brazing of dissimilar materials was studied, allowing for plastic deformations of instantaneous plasticity and creep. The role of plastic deformations in joint formation and residual stresses in vacuum diffusion welding of dissimilar metals, in particular of metals with non-metals, as well as similar metals with interlayers is considered. Application of temperature loading simultaneously with external load at vacuum diffusion welding of dissimilar metals allows creating a bulk stressed state in the butt joint, with formation of axial, radial, circumferential, tangential stresses, promoting localization of plastic deformations in the butt joint zone and development of shear deformations, and intensification of the processes of formation of physical contact, activation of the surfaces and development of diffusion processes. Control of stress-strain state at joining of metals with non-metals allows regulation of relaxation processes at cooling and prevention of joint fracture. 12 Ref., 9 Fig.

*Keywords*: diffusion welding, brazing, stresses, strains, modeling, structure, mechanical properties, diffusion

Поступила в редакцію 30.03.2018