

УДК 621.791.03

*Квасницкий В. В.<sup>1,2</sup>, Матвиенко М. В.<sup>3</sup>, Левченко И. Л.<sup>4</sup>*<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Украина, г. Киев<sup>2</sup> Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский Институт сварки им. Е. О. Патона). КНР, г. Гуанчжоу<sup>3</sup> Херсонский филиал Национального университета кораблестроения. Украина, г. Херсон<sup>4</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

## ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С УПРАВЛЯЕМЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ

*Методом компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние формирующееся в зоне стыка соединяемых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов находящихся в различном структурном состоянии при диффузионной сварке в вакууме. Анализ полученных результатов исследования напряженно-деформированного состояния в зоне стыка показывает, что использование структурных превращений позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием, интенсифицировать термомодеформационные процессы по стыку. Это обеспечивает интенсификацию пластических деформаций в стыке, активацию соединяемых поверхностей заготовок, локализацию деформаций в зоне стыка.*

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме; напряженно-деформированное состояние; жаропрочные сплавы; деформации ползучести; компьютерное моделирование; структурные превращения.

### Введение

Основными конструкционными материалами в газотурбостроении, энергетике, новой технике и других отраслях являются жаропрочные никелевые сплавы, которые имеют сложное легирование для обеспечения жаростойкости и жаропрочности [1]. С увеличением количества упрочняющей  $\gamma'$ -фазы ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ) прочность таких материалов увеличивается, а сварка плавлением усложняется [2]. Современные литейные жаропрочные дисперсионотвердеющие никелевые сплавы с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы характеризуются плохой свариваемостью и склонны к образованию дефектов при сварке плавлением. Поэтому для их соединения при изготовлении деталей и узлов используют пайку и сварку в твердом состоянии, в частности сварку трением и диффузионную сварку в вакууме.

Соединение в твердом состоянии сплавов, которые имеют термодинамически прочные оксидные пленки и высокое сопротивление ползучести также имеет свои проблемы. Для активации соединяемых поверхностей используют промежуточные расплавляющиеся и нерасплавляющиеся прослойки, ультрадисперсные порошки, циклическое изменение давления сжатия, модифицирование поверхностей и другие меры [3]. Однако они не всегда при-

менимы при производстве конкретных узлов ввиду их конструктивных особенностей, формы поверхности соединения, физико-механических свойств соединяемых материалов.

### Постановка задачи

Общепризнанным при диффузионной сварке является представление о трех стадиях процесса: образование физического контакта, активация поверхностей и объемное взаимодействие соединяемых материалов. Установлено, что на каждой из этих стадий протекание термомодеформационных процессов является одним из главных факторов влияния на формирование соединений. Для регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) узлов необходимо знать конкретные факторы, управление которыми позволяет выбрать оптимальные схемы и параметры режима сварки давлением жаропрочных сплавов. Для диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) такие исследования ранее не проводились. Поэтому данная работа является актуальной.

Цель работы — исследование напряженно-деформированного состояния формирующегося при ДСВ жаропрочных сплавов находящихся в разном структурном состоянии с учетом структурных напряжений и деформаций ползучести.

Основная часть

В работах [4, 5] путем компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) исследовано НДС узлов из разнородных материалов и установлено, что термоциклирование является эффективным средством управления НДС при ДСВ материалов, которые имеют разные значения температурных коэффициентов линейного расширения, сопротивления пластической деформации, жесткости, структурные превращения.

При изготовлении деталей и узлов из жаропрочных никелевых сплавов соединяться могут одноименные или разноименные сплавы. При этом они могут находиться в состоянии после аустенизации или после старения для выделения упрочняющих фаз. Известно [6, 7], что структурные деформации жаропрочных сплавов зависят от выделения или растворения упрочняющих фаз, а их количество и дисперсность определяются температурой и временем пребывания сплава при определенной температуре. Основными выделяющимися фазами являются  $\gamma'$ -фаза  $Ni_3(Al, Ti)$  и карбиды типа  $Me_6C$ , в основном вольфрама и молибдена. Установлено что распад твердого раствора при температуре старения начинается уже с минутной выдержки аустенизированных образцов. Как при нагреве, так и при охлаждении  $\gamma'$ -фаза во многих сплавах выделяется наиболее интенсивно при температуре 800...850 °С. Распад твердого раствора начинается после инкубационного периода, продолжительность которого уменьшается с повышением температуры. При температуре 850 °С инкубационный период составляет около 5 мин, при 900...1000 °С – 1,0...1,5 мин. Выделение  $\gamma'$ -фазы сопровождается уменьшением объема сплава, растворение – увеличением. Распад твердого раствора происходит наиболее интенсивно в первые 25 минут и мало зависит от скорости охлаждения. Во многих сплавах распад твердого раствора в значительной степени происходит при охлаждении на воздухе. С увеличением содержания легирующих элементов распад смещается в область более высоких температур.

Учитывая влияние на выделение и растворение упрочняющих фаз различных факторов, тепловое расширение и структурные деформации жаропрочных сплавов типа ЧС70, ЧС88, ЧС104 изучали на исследовательском комплексе Gleeble-3800 в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при различных скоростях нагрева и охлаждения. Некоторые дилатогаммы сплава ЧС88У-ВИ после полной термической обработки и после аустенизации приведены в работе [8] и показаны на рис. 1.

Моделирование НДС проводили с учетом деформаций мгновенной пластичности и деформаций ползучести. Для этого использовали имеющиеся в литературе зависимости модулей упругости и предела текучести материала от температуры, а

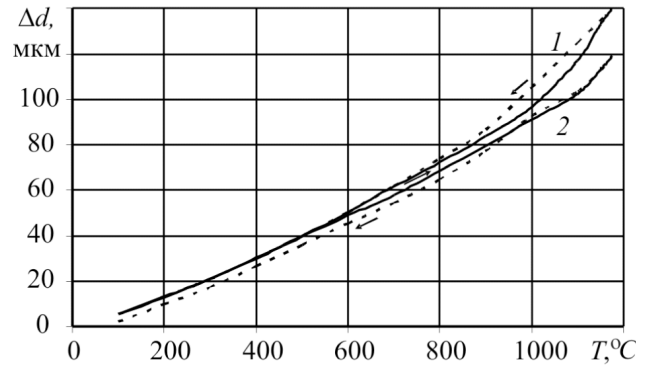


Рис. 1. Дилатогаммы сплава ЧС88У-ВИ после полной стандартной термической обработки (1) и после аустенизации (охлаждение в воде) (2) (нагрев показан сплошными линиями, а охлаждение пунктирными)

также определяли деформации ползучести по уравнению для первой и второй стадий:

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

где  $C_1...C_7$  – коэффициенты, определяемые из экспериментально полученных кривых ползучести, при этом  $C_1 = 5,934 \cdot 10^{-18}$ ;  $C_2 = C_6 = 3,86$ ;  $C_3 = -0,5$ ;  $C_4 = C_7 = 45860$ ;  $C_5 = 1,395 \cdot 10^{-19}$ .

Моделировали НДС при ДСВ жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ в различном структурном состоянии. Рассматривали сварку двух цилиндров, один из которых находился в состоянии аустенизации (охлаждение в воде от температуры 1180 °С), а второй – после полной стандартной термообработки (старения). Конечно-элементная модель и температурный цикл сварки показаны на рис. 2. Нагрев до температуры 1000 °С проводили со скоростью 2 °С/с от 1000 до 1175 °С – 0,7 °С/с, охлаждение – 2 °С/с. Давление сжатия составляло 20 МПа.

По результатам компьютерного моделирования построены поля и эпюры радиальных  $\sigma_x$ , осевых  $\sigma_y$ , окружных  $\sigma_z$ , касательных  $\tau_{xy}$  и эквивалентных  $\sigma_{экр}$  напряжений, а также поля и эпюры радиальных  $\epsilon_x$ , осевых  $\epsilon_y$ , окружных  $\epsilon_z$ , касательных  $\epsilon_{xy}$  и эквивалентных  $\epsilon_{экр}$  пластических деформаций.

Установлено, что в условиях ДСВ образцов в разном структурном состоянии формируется сложное напряженное состояние с появлением радиальных, осевых, окружных и эквивалентных напряжений и пластических деформаций ползучести. Поля касательных и эквивалентных деформаций ползучести показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Как видно из рис. 3 и 4 пластические деформации  $\epsilon_{xy}$  и  $\epsilon_{экр}$  локализуются в зоне стыка. Аналогично распределяются радиальные и окружные деформации.

Положительное влияние различного структурного состояния соединяемых образцов обусловлено

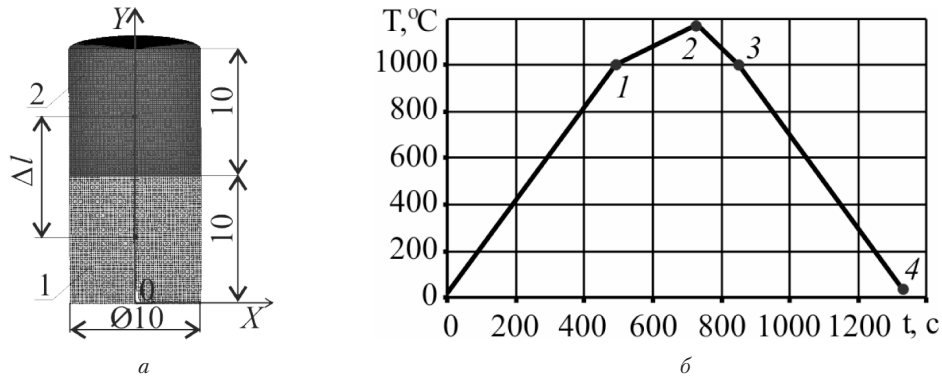


Рис. 2. Конечно-элементная модель сварного соединения (а) сплава ЧС88У ВИ после полной стандартной термической обработки (2) и после аустенизации (охлаждение в воде от температуры 1180 °С) (1) и температурный цикл сварки (б)

появлением радиальных, окружных и касательных напряжений с максимальными значениями в стыке, связано с интенсификацией термомеханических процессов, локализацией пластических деформаций в зоне стыка.

Эпюры распределения деформаций сдвига и эквивалентных деформаций показаны на рис. 5 и рис. 6.

Анализ дилатометрических кривых (рис. 1) показывает, что при нагреве до температуры 600 °С кривые для аустенизированного и состаренного состояния совпадают. Существенные различия между ними наблюдаются после начала растворения упрочняющей фазы с 1000 °С. С этой температуры начинается рост напряжений и возникновение пластических деформаций ползучести. Пластическое деформирование металла происходит практически в температурном интервале 1000...1175 °С при нагреве и охлаждении. Экспериментально установлено, что пластические деформации развиваются также в процессе выдержки при постоянной температуре 1150 °С, если продолжается растворение имеющейся  $\gamma'$ -фазы.

Компьютерное моделирование подтверждает развитие пластических деформаций в зоне стыка в процессе ДСВ при соединении жаропрочных сплавов, находящихся в различном структурном состоянии: аустенизированном и состаренном. Как показано в работе [9] получение таких поверхностей можно совместить с процессом модифицирования с использованием высокоэнергетических плазменных потоков путем обработки состаренного материала. Микроструктура такого соединения сплава ЧС88У-ВИ показана на рис. 7.

### Выводы

1. Методом компьютерного моделирования и экспериментально показано, что при диффузионной сварке в вакууме жаропроч-

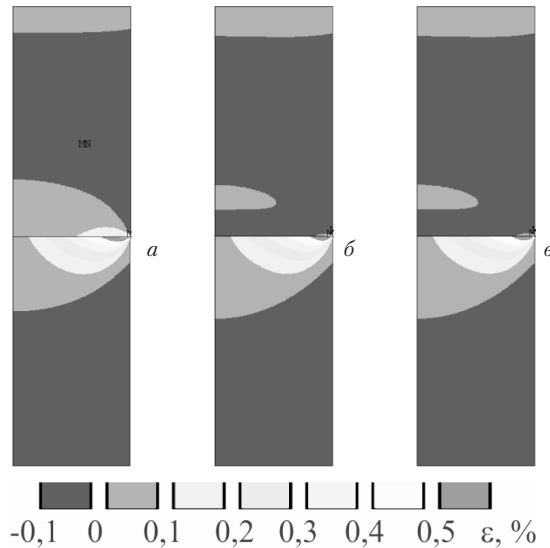


Рис. 3. Поля касательных  $\epsilon_{xy}$  деформаций ползучести в сечении модели в моменты окончания нагрева до 1175 °С (а), охлаждения до 1000 °С (б) и охлаждения до 20 °С (в)

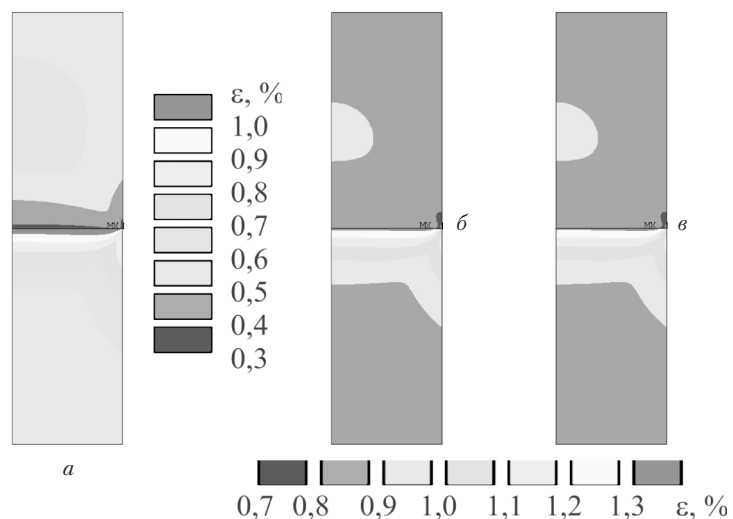


Рис. 4. Поля эквивалентных  $\epsilon_{экв}$  деформаций ползучести в сечении модели в моменты окончания нагрева до 1175 °С (а), охлаждения до 1000 °С (б), охлаждения до 20 °С (в)

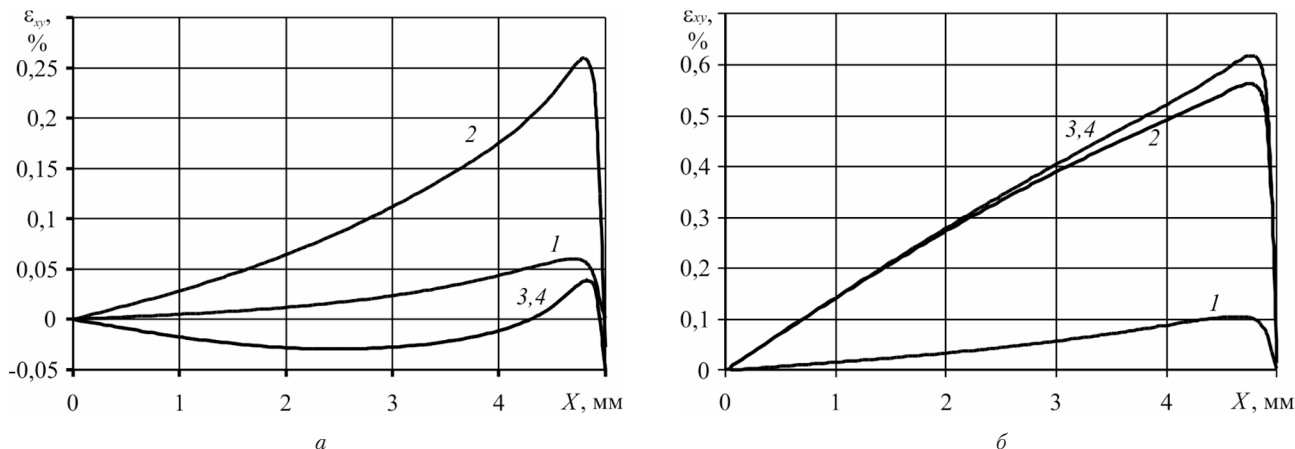


Рис. 5. Эпюры деформаций сдвига  $\epsilon_{xy}$  в зоне стыка при ползучести в сплаве ЧС88У-ВИ после полной стандартной термической обработки (а) и после закалки в воде (б) в моменты окончания нагрева до 1000 °С (1), до 1175 °С (2), охлаждения до 1000 °С (3) и охлаждения до 20 °С (4)

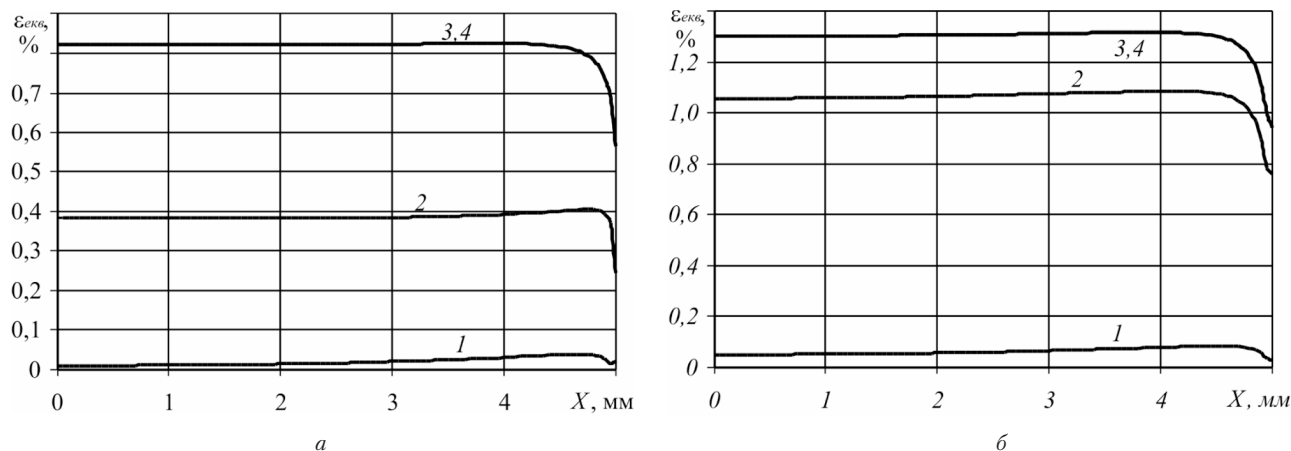


Рис. 6. Эпюры эквивалентных  $\epsilon_{экв}$  деформаций ползучести в зоне стыка в сплаве ЧС88У-ВИ после полной стандартной термической обработки (а) и после закалки в воде (б) в момент окончания нагрева до 1000 °С (1), до 1175 °С (2), охлаждения до 1000 °С (3) и охлаждения до 20 °С (4)

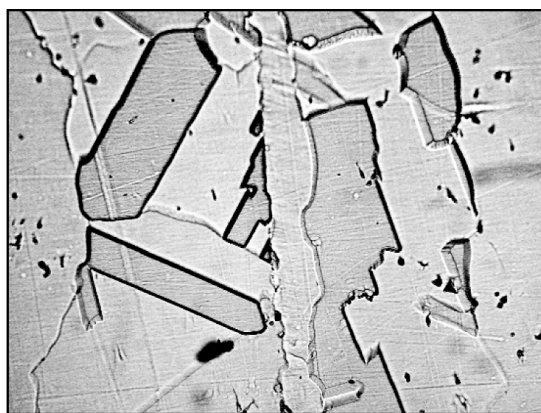


Рис. 7. Микроструктура соединения при ДСВ сплава ЧС88У-ВИ в разном структурном состоянии; х 200

ных сплавов использование структурных превращений и деформаций позволяет интенсифицировать развитие термомеханических процессов в

зоне стыка обеспечивающих деформационную активацию поверхностей.

2. Установлено, что соединение заготовок жаропрочных сплавов находящихся в состаренном и аустенизированном структурном состоянии позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием и локализовать деформации в зоне стыка, что обеспечивает возможность снижения величины параметров режима диффузионной сварки и уровня общих деформаций сварных узлов.

Работа выполнялась при поддержке Программы инновационной группы провинции Гуандун, КНР № 201101C0104901263 (Guangdong Innovative Research Team Program No.201101C0104901263, China), Программы иностранных экспертов КНР №.WQ20124400119 (Chinese Program of Foreign Experts No.WQ20124400119), проекта Гуандунской ключевой лаборатории современной технологии сварки № 2012A061400011, КНР (Project of Guangdong Provincial Key Laboratory No. 2012A061400011, China), Проекта международного сотрудничества «Изучение технологии соединения диффузионной сваркой с расплавляющейся прослойкой высокотемпературного

сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al», №.2015DFR50310, KHP (International cooperation project No. 2015DFR50310 «Study on transient liquid phase diffusion bonding technology of Ni<sub>3</sub>Al high temperature alloy», China).

### Литература

- [1] Каблов Е. Н. Жаропрочность никелевых сплавов [Текст] / Е. Н. Каблов, Е. Ф. Галубовский. — М.: Машиностроение, 1998. — 464 с.
- [2] Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении [Текст] / В. Ф. Квасницкий. — Л.: Судостроение, 1986. — 224 с.
- [3] Конюшков Г. В. Специальные методы сварки давлением [Текст]. Учебн. пособ. / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. — Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. — 632 с.
- [4] Махненко В. И. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке материалов с различными физико-механическими свойствами [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка, 2008, № 8. — С. 5–10.
- [5] Махненко В. И. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой [Текст] / В. И. Махненко В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка, 2009, № 8. — С. 11–16.
- [6] Изучение кинетики упрочнения и разупрочнения жаропрочных сплавов с целью выбора температурного интервала горячей пластической деформации и термической обработки [Текст] / Н. П. Жетвин, Я. Л. Фрид, Е. М. Концевая и др. // Свойства и применение жаропрочных сплавов. — М.: Наука, 1966. — С. 212–218.
- [7] Зрюмов В. П. Кинетика изотермического распада пересыщенного твердого раствора сплава ХН62БМКТЮ / В. П. Зрюмов, А. Я. Шиняев // Металловедение и термическая обработка металлов, 1986, № 2. — С. 37–39.
- [8] Квасницкий В. В. Проблемы компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния при изготовлении конструкций с применением сварки и родственных технологий [Текст] / В. В. Квасницкий, М. В. Матвиенко, С. Н. Михайлов // 36. науч. праць НУК, 2011, № 1. — С. 89–95.
- [9] Квасницкий В. В. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов с модифицированными поверхностями [Текст] / В. В. Квасницкий, Н. Н. Черенда, И. А. Колесар // Проблеми техніки: Наук.-вироб. журнал. — Одеса: ОНМУ, Хм. НУК, 2011, № 3. — С. 121–128.

*Kvasnytskyi V. V.<sup>1,2</sup>, Matviienko M. V.<sup>3</sup>, Levchenko I. L.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding). China, Guangzhou

<sup>3</sup> Kherson Branch of National University of Shipbuilding. Ukraine, Kherson

<sup>4</sup> E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

### DIFFUSION WELDING IN VACUUM OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS WITH CONTROLLED STRESS-STRAIN STATE

*With method of the computer modeling is investigated of stress-strain state (SSS) which is formed in the seam zone of joined billets made of heat-resistant nickel alloys in different structural condition when diffusion welding in vacuum. Analysis of received results of study of SSS in zone of the joint butt shows that use the structural transformations allows controlling of SSS, intensified of thermo-deformation processes over the joint butt. This is provides for intensification of plastic strain in the joint butt, activation the joined surfaces of billets, localization of deformations in the seam zone.*

*Keywords:* diffusion welding in vacuum; stress-strain state (SSS); heat-resistant alloys; creep strains; computer modeling; structural transformations.

### References

- [1] Kablov E. N. Zharoprochnost' nikelovykh splavov [Tekst] / E. N. Kablov, E. F. Galubovskiy. — M.: Mashinostroenie, 1998. — 464 s.
- [2] Kvasnytskyi V. F. Svarka i payka zharoprochnih splavov v sudostroenii [Tekst] / V. F. Kvasnytskyi. — L.: Sudostroenie, 1986. — 224 s.

- [3] Koniushkov G. V. Spetsal'nie metody svarki davleniem [Tekst]. Uchebn. posob. / G. V. Koniushkov, R. A. Musin. — Saratov: Ai Pi Er Media, 2009. — 632 s.
- [4] Makhnenko V. I. Napriazhonno-deformirovannoe sostoianie pri diffuzionnoy svarke materialov s razlichnymi fiziko-mehaničeskimi svoystvami [Tekst] / V. I. Makhnenko, V. V. Kvasnytskyi, G. V. Ermolaev // Avtomatičeskaia svarka, 2008, № 8. — S. 5–10.
- [5] Makhnenko V. I. Osobennosti formirovania napriazhonno-deformirovannogo sostoianiia soedineniy raznorodnyh materialov, poluchenih diffuzionnoy svarkoy [Tekst] / V. I. Makhnenko, V. V. Kvasnytskyi // Avtomatičeskaia svarka, 2009, № 8. — S. 11–16.
- [6] Izučenie kinetiki uprochnenia i razuprochnenia zharoprochnih splavov s tsel'u vibora temperaturного интервала goričhey plastičeskoj deformastii i termičeskoj obrabotki [Tekst] / N. P. Zhetvin, Ia. L. Frid, E. M. Kontsevaia i dr. // Svoystva i primenenie zharoprochnih splavov. — SM.: Nauka, 1966. — S. 212–218.
- [7] Zriumov V. P. Kinetika izotermičeskogo raspada perenasistčhenogo tverdogo rastvora splava KhN62BMKTiU / V. P. Zriumov, A. Ia. Shiniaev // Metallovedenie i termičeskaia obrabotka metallov, 1986, № 2. — S. 37–39.
- [8] Kvasnytskyi V. V. Problemi komp'utornogo modelirovania napriazhenno-deformirovannogo sostoiania pri izgotovlenii konstruksiy s primeneniem svarki i rodstvennyh tekhnologiy [Tekst] / V. V. Kvasnytskyi, M. V. Matviienko, C. N. Mikhaylov // Zb. nauk. prats NUK, 2011, № 1. — S. 89–95.
- [9] Kvasnytskyi V. V. Diffuzionnaia svarka zharoprochnih splavov s modifitsirovannimi poverhnostiami [Terst] / V. V. Kvasnytskyi, N. N. Cherenda, I. A. Kolesar // Problemy tehniki: Nauk.- vyrob. zhurnal.— Odesa: ONMU, Khm.NUK, 2011, № 3.— S. 121–128.