

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ СОЕДИНЕНИЙ С РАЗВИТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ КОНТАКТА

© С. А. Чернецкий, Е. В. Карпович

Дніпропетровський національний університет

Наведено математичну модель процесів, що відбуваються при дифузійному зварюванні деталей із різномірних матеріалів по розвинених поверхнях, та її реалізацію методом скінченних елементів. Наведено результати числового експерименту та даються рекомендації щодо вибору геометричних, фізико-механічних і теплофізичних властивостей зварюваних матеріалів.

Процесс диффузионной сварки соединений по развитым охватываемым поверхностям заключается в сборке деталей с натягом, обеспечивающим при температуре сварки требуемое давление, нагреве, выдержке собранной конструкции и охлаждении. Очевидно, что в любых неразъемных соединениях материалов с разными значениями коэффициентов термического расширения при тепловых воздействиях возникают напряжения. Наиболее неблагоприятные из них, обычно растягивающие, снижают эксплуатационные характеристики соединений и могут привести к разрушению. В то же время сжимающие напряжения могут оказаться полезными и использоваться как дополнительный резерв повышения эксплуатационных характеристик соединений. Таким образом, определение остаточных напряжений является не только теоретической, но и прикладной задачей.

К источникам образования остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях рассматриваемого типа можно отнести:

1. Сборочные напряжения и деформации, используемые для создания требуемого для сварки давления в контакте.

2. Пластические деформации, возникающие вследствие воздействия на соединяемые материалы контактного давления и температуры на всех этапах сварки.

3. Напряжения и деформации, возникающие вследствие различия в коэффициентах термического расширения соединяемых материалов при термических воздействиях.

4. Термические напряжения и деформации, возникающие вследствие градиента температур в объеме изделия при нагреве и охлаждении.

5. Напряжения и деформации, возникающие в

результате образования в процессе сварки промежуточных материалов (интерметаллидов), отличающихся удельными объемами и параметрами кристаллической решетки от основных материалов.

6. Напряжения и деформации, возникающие в результате структурных (полиморфных) превращений в соединяемых материалах.

Собственные напряжения, источниками которых являются напряжения и деформации, перечисленные в пунктах 5 и 6, могут быть отнесены к напряжениям 2-го и 3-го рода по существующей классификации [4]. Эти напряжения уравниваются в микрообъемах, соизмеримых с объемом одного или нескольких зерен металла, учет их чрезвычайно затруднителен. Вследствие локальности их действия и малой величины следует ожидать и незначительного влияния на эксплуатационные характеристики соединения.

К особенностям технологии диффузионной сварки можно отнести относительно низкие скорости нагрева и охлаждения, не носящие, в отличие от сварки плавлением, ярко выраженного местного характера. Ввиду малости градиента температуры термические напряжения малы и существенного влияния на величину остаточных напряжений в соединении не оказывают.

Обязательным условием получения сварного соединения является создание физического контакта соединяемых материалов, которое осуществляется путем пластического деформирования микронеровностей на контактных поверхностях. Экспериментально установлено, что максимальная скорость роста площади физического контакта соответствует области, в которой металл в объеме деформируется упруго [2]. Но даже при вполне упругом деформировании соединяемых материалов для получения

соединения важно обеспечить пластическую деформацию микронеровностей на этапе нагрева и выдержки. Это может быть достигнуто при деформации хотя бы одной из деталей до предела упругости.

Диффузионная сварка производится при относительно высокой температуре, достигающей 0.7—0.8 температуры плавления более легкоплавкого материала конструкции [1]. При таких температурах в металле интенсивно протекают релаксационные процессы, в результате которых напряженное состояние в сборке за время выдержки изменяется, и как следствие уменьшается контактное давление практически до нуля. Процесс изменения давления является неконтролируемым в отличие от сварки в стык, при которой давление создается приложением внешнего контролируемого усилия. Анализ литературных данных о влиянии величины давления в контакте на кинетику сварки показал, что давление является второстепенным, а температура — главным параметром процесса [1, 2]. Величина давления оказывает существенное влияние на прочность соединения только на начальном этапе выдержки. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что релаксация не оказывает значительного влияния на качество сварного соединения.

Сборочные напряжения и деформации, а также напряжения и деформации, возникающие вследствие различия в коэффициентах термического расширения соединяемых материалов, действуют в макрообъемах. Вызываемые ими остаточные напряжения можно отнести к напряжениям первого рода и они оказывают решающее влияние на эксплуатационные характеристики соединений.

В результате проведенного анализа возникающих напряжений в процессе сварки возникает необходимость в разработке математической модели, которая позволила бы определить значения напряжений, деформаций и перемещений в контакте при нагреве, выдержке и охлаждении соединения. При этом следует установить, в области каких деформаций необходимо вести расчет — упругих или пластических. Согласно условиям получения сварного соединения достаточно, чтобы произошла микропластическая деформация микронеровностей, то есть был достигнут предел упругости. Однако в действительности с повышением температуры изменяются как физико-механические, так и теплофизические свойства материалов, что неизбежно приводит к возникновению пластических деформаций. Отсутствие достоверных данных по свойствам материалов при высоких температурах не позволяет математически оценить величину пластических деформаций с достаточной точностью. При расчете достаточно знать, что детали начали деформиро-

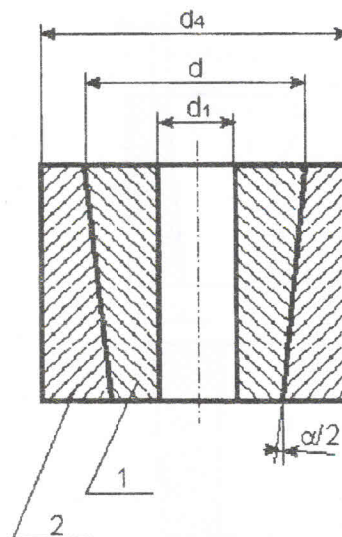


Рис. 1. Схема сварного соединения

ваться пластически. Таким образом, расчет можно проводить в условиях упругого деформирования деталей, но необходимо достичь хотя бы предела упругости материала.

В общем виде соединение можно представить как составной цилиндр, внутренний слой 1 которого представляет собой прямой конус с углом конуса α , наружный слой 2 — обратный конус с таким же углом конуса, d_1 , d , d_4 — размеры соединения (рис. 1). Обе детали являются толстостенными.

Оба слоя сцеплены при нормальной температуре посредством натяга и подвергаются температурному воздействию (нагреву, выдержке и охлаждению). Величина натяга определяется как геометрическая разность между наружным диаметром первого слоя d_2 и внутренним диаметром второго d_3 (рис. 2). Контактные поверхности слоев оказываются нагруженными равными давлениями. Величина давлений не должна превышать минимального значения предела упругости материала слоев. Невыполнение этого условия может привести к возникновению зазора между слоями при температурном расширении во время нагрева из-за остаточных пластических деформаций. Температурное поле можно считать постоянным по объему тела.

На различных этапах сварки возникают различные условия контакта слоев. Нагрев будет сопровождаться расширением деталей, уменьшением контактного давления, проскальзыванием слоев в месте контакта друг относительно друга вдоль оси z , перемещением границы контакта в радиальном направлении и, возможно, образованием зазора.

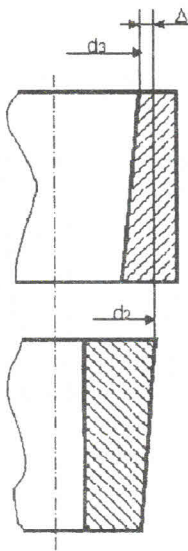


Рис. 2. Схема определения величины натяга

При выдержке будет происходить релаксация напряжений, уменьшение контактного давления до нуля. После выдержки соединение представляет собой сплошное тело, в котором слои будут жестко сцеплены. Остывание будет сопровождаться сжатием деталей и увеличением остаточных внутренних напряжений, которые, в зависимости от скорости охлаждения, могут релаксировать на некоторую величину. Наибольшее значение остаточных напряжений соответствует случаю, когда релаксация отсутствует. Неучтенное значение величины релаксации напряжений можно отнести в запас прочности соединения или определить экспериментальным путем в виде коэффициента при конкретных условиях сварки.

Таким образом, задача разбивается на две.

Задача 1. Определение напряженно-деформированного состояния тела, находящегося в ненапряженном и недеформированном состоянии при температуре T_0 , после нагревания до некоторой температуры T при наличии натяга Δ . В этой задаче предполагается, что возможно расслоение тела и проскальзывание слоев вдоль контактной поверхности без трения.

Задача 2. Определение напряженно-деформированного состояния тела, находящегося в ненапряженном и недеформированном состоянии при температуре T_0 , после остывания до некоторой температуры. В этом случае предполагается полное сцепление слоев.

В такой постановке задачу невозможно решить в

аналитическом виде. Наиболее приемлемым методом для отыскания приближенного решения является метод конечных элементов, который заключается в минимизации потенциальной энергии системы [5].

Полная потенциальная энергия упругой системы определяется функционалом $I = U - A$, где U — потенциальная энергия, накапливаемая в упругом теле, A — работа объемных и поверхностных сил [6]. Поскольку сосредоточенные, объемные и поверхностные силы отсутствуют, то $A = 0$ и $I = U$.

Приращение удельной потенциальной энергии в единице объема тела определяется по формуле

$$\delta W = \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, ε_{ij} — компоненты тензора деформаций. Для осесимметричной задачи формула (1) примет вид

$$\delta W = \sigma_{rr} \delta \varepsilon_{rr} + \sigma_{\theta\theta} \delta \varepsilon_{\theta\theta} + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_{zz} + 2\sigma_{rz} \delta \varepsilon_{rz}. \quad (2)$$

В полярной системе координат закон Гука для осесимметричной задачи при наличии температурного воздействия выражается соотношениями

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda\varepsilon_{\theta\theta} + \lambda\varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_0), \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda\varepsilon_{rr} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\theta\theta} + \lambda\varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_0), \\ \sigma_{zz} &= \lambda\varepsilon_{rr} + \lambda\varepsilon_{\theta\theta} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_0), \\ \sigma_{rz} &= 2\mu\varepsilon_{rz}, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} — нормальные, σ_{rz} — касательная составляющая тензора напряжений; ε_{rr} , $\varepsilon_{\theta\theta}$, ε_{zz} — нормальные, ε_{rz} — касательная компоненты тензора деформаций; α — коэффициент линейного температурного расширения; T_0 , T — начальная и конечная температуры тела; λ и μ — постоянные Ляме.

После подстановки соотношений (3) в (2) и простых преобразований удельная потенциальная энергия деформации в единице объема будет определяться формулой

$$\begin{aligned} W &= \frac{a_1}{2}(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}^2) + a_2(\varepsilon_{rr}\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{\theta\theta}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{rr}) + \\ &+ a_3(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}) + a_4\varepsilon_{rz}^2, \end{aligned}$$

где $a_1 = \lambda + 2\mu$, $a_2 = \lambda$, $a_3 = -(3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_0)$, $a_4 = 2\mu$.

Потенциальная энергия, накапливаемая во всем теле, определяется суммированием удельной потенциальной энергии по всему объему тела:

$$U = \int_V W r dr dz. \quad (4)$$

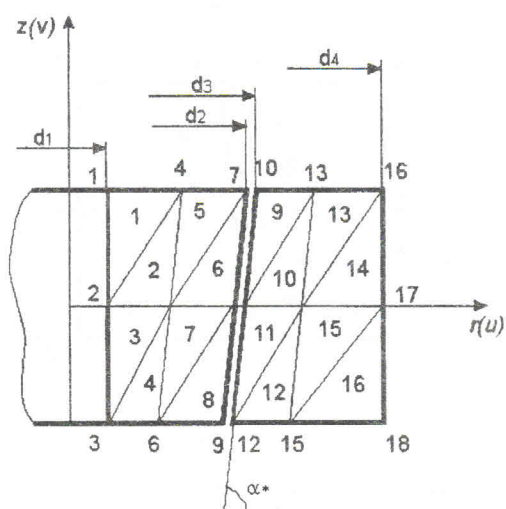


Рис. 3. Схема разбиения соединения

Тогда задача 1 сводится к задаче минимизации функционала (4) при выполнении условий непроникания на границе слоев [3]:

$$u_{v2} \geq u_{v1} + \Delta z \sin \alpha, \quad (5)$$

где u_{vk} — нормальные к поверхности контакта перемещения k -го слоя ($k = 1, 2$).

Задача 2 сводится к минимизации функционала (4) при выполнении условий сцепления слоев:

$$u_{v2} = u_{v1}, \quad u_{t2} = u_{t1}, \quad (6)$$

где u_{tk} — касательные компоненты вектора перемещений k -го слоя.

Дискретизация вариационных задач (4)–(6) осуществляется методом конечных элементов. В силу осевой симметрии задачи рассматривается осевое сечение тела (рис. 3), которое разбивается на треугольные симплекс-элементы.

Из рис. 3 видно, что используются два типа треугольных конечных элементов, которые отличаются ориентацией. Первый тип элемента представлен на рис. 4, а, второй — на рис. 4, б.

Аппроксимация искомого поля перемещений внутри конечного элемента осуществляется при помощи линейных полиномов

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 \eta, \\ v &= \beta_1 + \beta_2 \xi + \beta_3 \eta. \end{aligned} \quad (7)$$

Значения постоянных α_i и β_i определяются через узловые перемещения конечного элемента и его геометрические параметры.

Соотношения связи между деформациями и перемещениями имеют вид

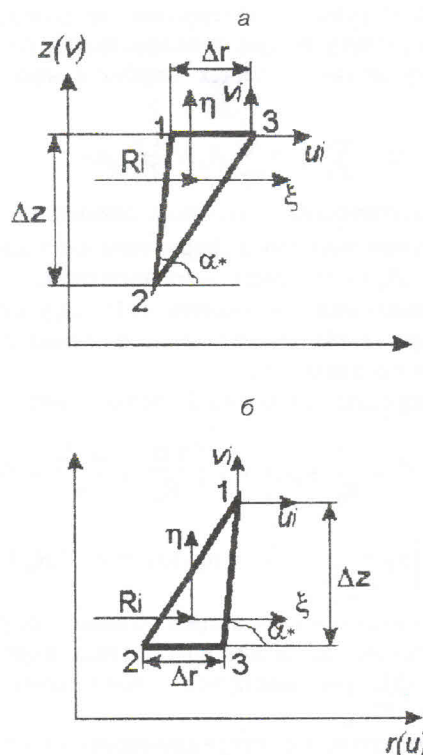


Рис. 4. Типы треугольных симплекс-элементов: а — первый тип; б — второй тип

ремещениями имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r}, & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{u}{r}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial v}{\partial z}, & \varepsilon_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Деформации в локальных координатах конечного элемента (ξ, η) будут определяться формулами

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial \xi}, & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{u}{R + \xi}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial v}{\partial \eta}, & \varepsilon_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \xi} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом (8) выражения будут следующими:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \alpha_{sup2}, & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{\alpha_1 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 \eta}{R_k + \xi}, \\ \varepsilon_{zz} &= \beta_3, & \varepsilon_{rz} &= \frac{1}{2} (\alpha_3 + \beta_2), \end{aligned} \quad (10)$$

где R_k — расстояние от оси z до центра тяжести k -го элемента.

При замене в функционале (4) интегрирования

по области V суммой интегралов по каждому конечному элементу и при использовании соотношений (10) функция узловых перемещений примет вид

$$I = \sum I_k = \sum_{k=1}^N R_k W_{k2} \frac{1}{2} \Delta r_k \Delta z_k, \quad (11)$$

где N — количество конечных элементов, W_k — потенциальная энергия деформации k -го элемента, $0.5 \Delta r_k \Delta z_k = A_k$ — площадь k -го элемента.

При вычислении выражения (11) подынтегральная функция в (4) считается постоянной в пределах конечного элемента.

Таким образом, функция I_k примет вид

$$I = \left[\frac{a_1}{2} \left(\alpha_2^2 + \frac{\alpha_1^2}{R_k^2} + \beta_3^2 \right) + a_2 \left(\frac{\alpha_2 \alpha_1}{R_k} + \frac{\alpha_1 \beta_3}{R_k} + \beta_3 \alpha_2 \right) + a_3 \left(\alpha_2 + \frac{\alpha_1}{R_k} + \beta_3 \right) + a_4 \frac{1}{4} (\alpha_3 + \beta_2)^2 \right] R_k A_k. \quad (12)$$

Для минимизации функции узловых перемещений (11) применяется вариант метода верхней релаксации [3], учитывающий ограничения в виде неравенств (5).

Алгоритм является итерационным. Одна итерация заключается в обходе узлов сетки конечных элементов. В каждом узле осуществляется минимизация функции (11) по соответствующим узловым перемещениям, считая остальные перемещения постоянными.

Для узлов, которые не лежат на поверхности контакта, а также для случая сцепления слоев условие минимизации эквивалентно решению системы

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial u_v} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha + \\ &+ \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha = 0, \\ \frac{\partial I}{\partial u_{v1}} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha + \\ &+ \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $I_1, I_2, I_3, I_6, I_7, I_8$ — значения функции (12), вычисленные по соответствующим конечным элементам, примыкающим к рассматриваемому узлу (рис. 5).

Учет ограничений (5) в задаче 1 осуществляется следующим образом. На границе контакта вводится два узла (рис. 5). Предполагая, что в данной точке наблюдается отставание слоев, система для определения неизвестных перемещений пары узлов будет

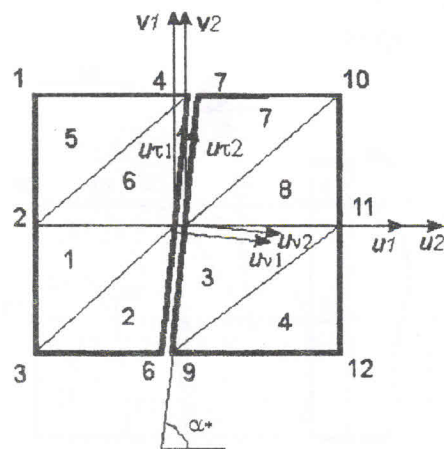


Рис. 5. Расчетная схема соединения

следующей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial u_{v1}} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha = 0, \\ \frac{\partial I}{\partial u_{v2}} &= \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha = 0, \\ \frac{\partial I}{\partial u_{v1}} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha = 0, \\ \frac{\partial I}{\partial u_{v2}} &= \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Если условия непроникания $u_{v2} > u_{v1} + \Delta \sin \alpha$ выполнены, то осуществляется переход к следующему узлу. Если оно нарушено, то есть отставания не произошло, минимизация функции сводится к решению системы

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial u_v} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha + \\ &+ \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha - \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha = 0, \\ \frac{\partial I}{\partial u_{v1}} &= \frac{\partial}{\partial u_1} (I_1 + I_2 + I_6) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_1} (I_1 + I_2 + I_6) \sin \alpha = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial I}{\partial u_{v2}} = \frac{\partial}{\partial u_2} (I_3 + I_7 + I_8) \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial v_2} (I_3 + I_7 + I_8) \sin \alpha = 0,$$

$$u_2 \sin \alpha - v_2 \cos \alpha = u_1 \sin \alpha - v_1 \cos \alpha + \Delta \sin \alpha.$$

В этом случае предполагается проскальзывание слоев без трения.

Итерационный процесс заканчивается, когда величина среднего квадратичного отклонения между

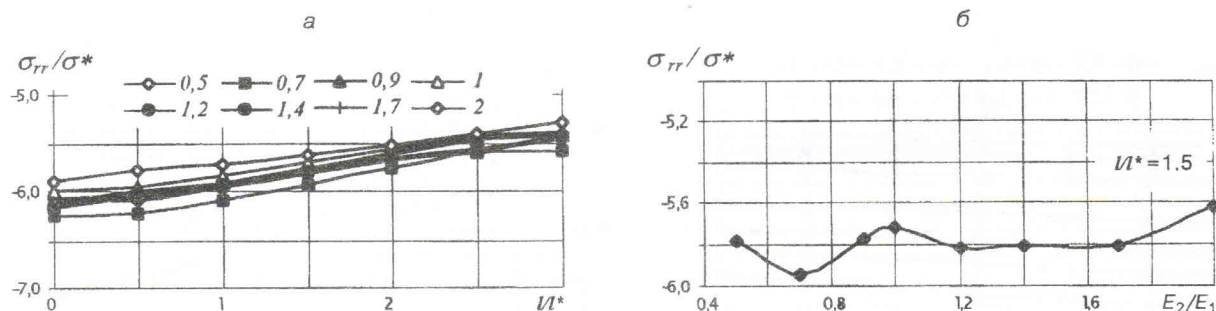


Рис. 6. Влияние коэффициента E_2/E_1 на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных E_2/E_1 в среднем сечении соединения

двумя последовательными приближениями станет меньше заданной:

$$\Delta_n = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_{n-1}^i - u_n^i)^2 + (v_{n-1}^i - v_n^i)^2} \leq \varepsilon_0,$$

где Δ_n — погрешность n -го приближения.

Данный алгоритм реализован в виде пакета программ на языке FORTRAN в среде Power Station 4.0.

В процессе численного эксперимента определялось влияние геометрических, физико-механических и теплофизических свойств свариваемых материалов на величину возникающих напряжений в соединении при нагревании и остывании соединения, учитывалась зависимость модуля Юнга и коэффициента температурного расширения от температуры.

Для уменьшения влияния погрешностей округления при решении задачи было произведено обезразмеривание всех параметров.

Исходные данные для расчета: $d_1 = 8$ мм, $d_2/d_1 = 2$, $d_4/d_3 = 2$, $L = 25$ мм — геометрические параметры соединения; $\alpha = 1.438^\circ$ — угол конуса; $\Delta = 0.02$ мм — натяг, обеспечивающий предельное упругое состояние менее прочной детали; $E_1 = 206$ ГПа; $\nu_1 = 0.25$; $\sigma_{r1} = 230$ МПа — физико-механические характеристики для Стали 12Х18Н10Т; $\alpha_1 = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/град; $T_{пл1} = 1089$ К — теплофизические свойства стали; $P_{св} = \sigma^* = 12$ МПа; $T_{св} \approx 0.7T_{пл} = 1266$ К — давление и температура сварки; $\varepsilon_0 = 0.01$ — точность расчета.

В качестве факторов, влияющих на величину напряжений в контакте при нагревании, были приняты следующие отношения:

$$\frac{E_2}{E_1}, \quad \frac{T_{пл2}}{T_{пл1}}, \quad \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \quad \frac{d_2}{d_1}, \quad \frac{d_4}{d_3},$$

где E_1, E_2 — модули Юнга; $T_{пл1}, T_{пл2}$ — температуры плавления; α_1, α_2 — коэффициенты температурного расширения материалов свариваемых деталей; d_1, d_2, d_3, d_4 — геометрические параметры соединения (рис. 1).

Влияние отношения E_2/E_1 исследовалось в пределах от 0.5 до 2. Результаты расчета приведены на рис. 6. Напряжения по длине соединения распределены неравномерно (рис. 6, а), но просматривается четкая линейная зависимость, связанная с наличием угла наклона поверхности контакта. Угол наклона аппроксимирующих прямых при различных E_2/E_1 практически не изменяется. Увеличение E_2/E_1 приводит к повышению величины напряжений в контакте (рис. 6, б), но эти изменения составляют не более 10 % между минимальным и максимальным значением. Анализ полученных результатов показал, что значительное изменение параметра E_2/E_1 практически не влияет на величину напряжений.

Результаты расчета, полученные при изменении коэффициентов $T_{пл2}/T_{пл1} = 0.5...2$ и $\alpha_2/\alpha_1 = 0.5...2$, приведены на рис. 7 и рис. 8. Видно, что распределения напряжений по длине также имеют линейную зависимость (рис. 7, а; 8, а). При $T_{пл2}/T_{пл1} < 1$ и $\alpha_2/\alpha_1 > 1$ напряжения в контакте уменьшаются, а при $T_{пл2}/T_{пл1} > 1$ и $\alpha_2/\alpha_1 < 1$ — увеличиваются (рис. 7, б; 8, б). Кроме того, при значении $\alpha_2/\alpha_1 \approx 1.15$ наблюдается отставание и $\sigma_{rr} = 0$.

На рис. 9 и 10 представлены зависимости величины напряжений от коэффициентов d_2/d_1 и d_4/d_3 , которые изменялись в пределах от 1.5 до 3. Оба графика имеют одинаковую экспоненциальную зависимость, которая объясняется тем, что изменения d_2/d_1 или d_4/d_3 при прочих неизменных условиях позволяют получить различные сборочные натяги, которые, в свою очередь, оказывают влияние на

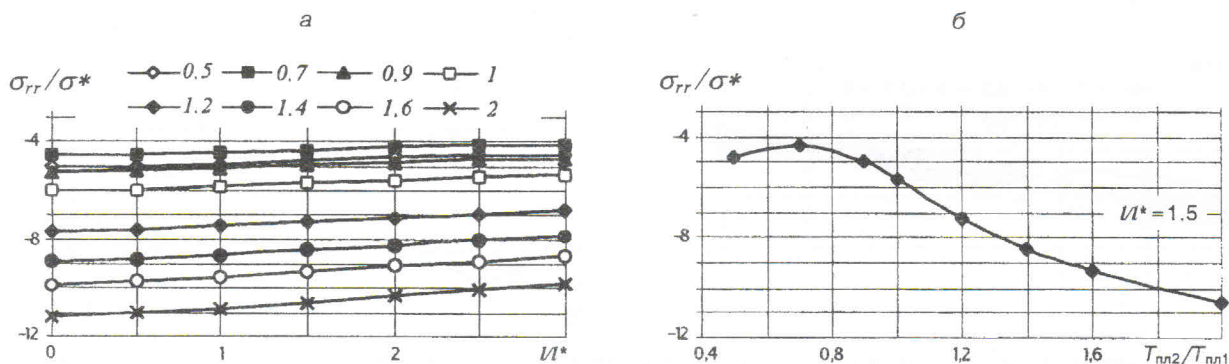


Рис. 7. Влияние коэффициента T_{nn2}/T_{nn1} на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных T_{nn2}/T_{nn1} в среднем сечении соединения

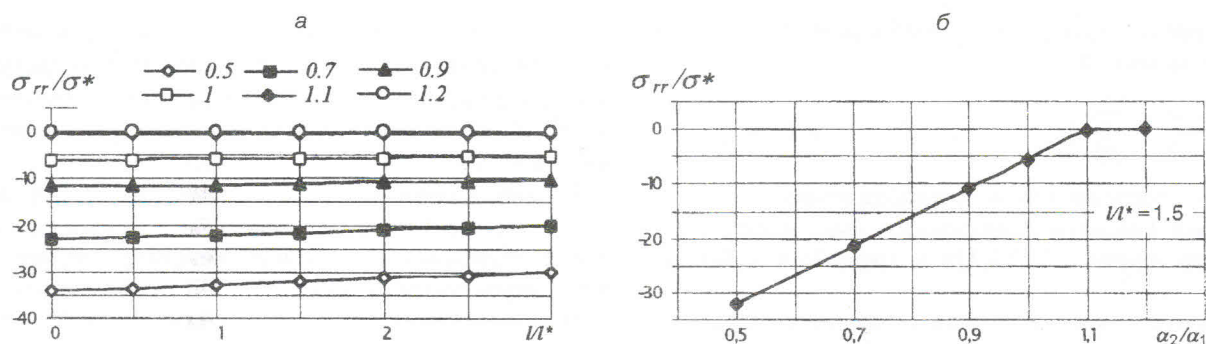


Рис. 8. Влияние коэффициента α_2/α_1 на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных α_2/α_1 в среднем сечении соединения

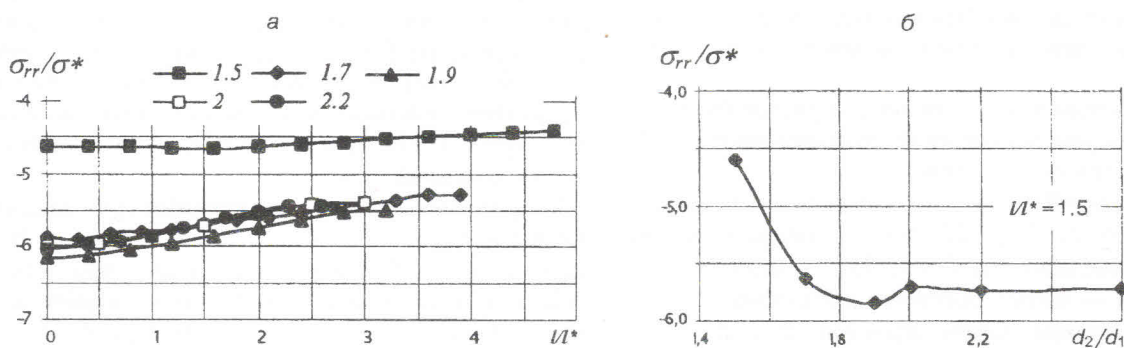


Рис. 9. Влияние коэффициента d_2/d_1 на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных d_2/d_1 в среднем сечении соединения

напряжения в контакте: вначале σ_{rr} очень сильно зависит от исследуемого параметра, затем при некотором d_2/d_1 или d_4/d_3 детали становятся равнопрочными, напряжения достигают своей предельной величины и, далее, практически не увеличиваются.

Одновременное изменение параметров d_2/d_1 и d_4/d_3 приводит к увеличению напряжений в кон-

такте, этот процесс также имеет экспоненциальную зависимость (рис. 11).

Как известно, остывание соединения сопровождается возникновением остаточных напряжений, величина которых зависит от разности в коэффициентах температурных расширений свариваемых материалов. Таким образом, для численного эксперимента в качестве изменяющегося параметра целе-

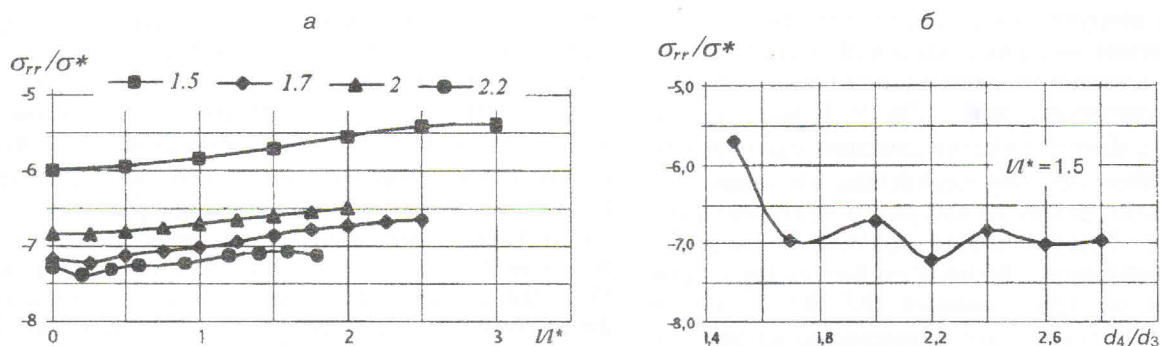


Рис. 10. Влияние коэффициента d_4/d_3 на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных d_4/d_3 в среднем сечении соединения

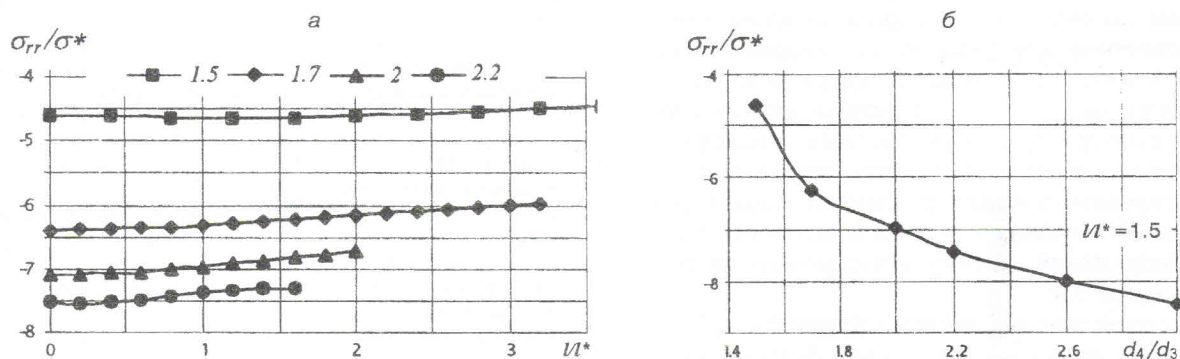


Рис. 11. Одновременное влияние коэффициентов d_2/d_1 и d_4/d_3 на величину напряжений в контакте: а — распределение напряжений по длине соединения; б — величина напряжений при различных d_4/d_3 в среднем сечении соединения

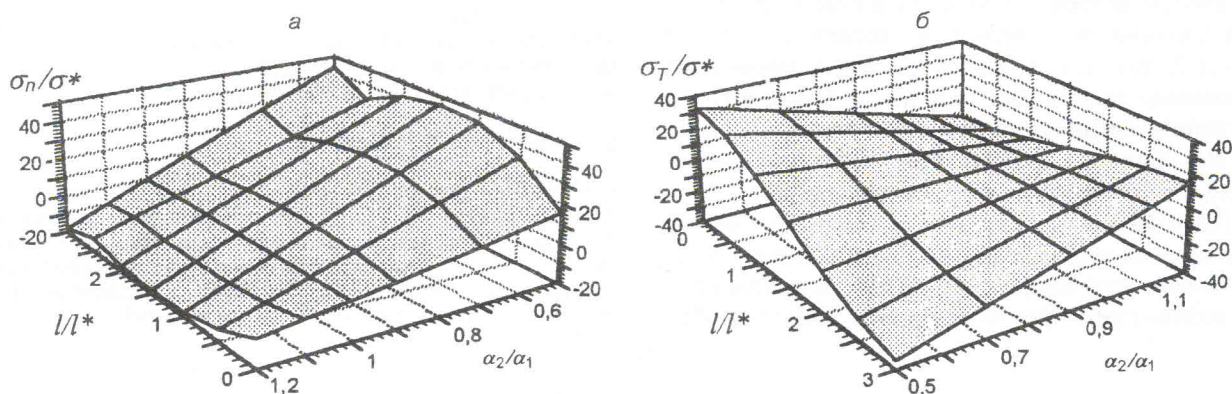


Рис. 12. Влияние α_2/α_1 на величину остаточных напряжений: а — распределение нормальных напряжений; б — распределение касательных напряжений

сообразно принять коэффициент α_2/α_1 , который будет изменяться в тех же пределах, что и при нагревании.

Влияние α_2/α_1 на величину остаточных напряжений показано на рис. 12. Видно, что остаточные

нормальные напряжения σ_n/σ^* , возникающие в направлении нормали к поверхности контакта (рис. 12, а), при $\alpha_2/\alpha_1 < 1$ являются растягивающими, и уже при $\alpha_2/\alpha_1 = 0.8$ достигают предела прочности соединения равного $\sigma_T/\sigma^* = 19$ и могут

привести к разрушению сварного шва; при $\alpha_2/\alpha_1 > 1$ напряжения — сжимающие и оказывают положительное влияние на эксплуатационные характеристики соединения, при $\alpha_2/\alpha_1 = 1$ напряжения равны нулю. Касательные напряжения σ_T/σ^* равны нулю в среднем сечении соединения, увеличиваются к его краям, равны по модулю и противоположны по знаку. При некотором значении l/l^* величина напряжений может превышать предел прочности соединения на срез, равный $0.5...0.8(\sigma_T/\sigma^*) = 10...15$, и привести к его разрушению на некоторых участках. Таким образом, величина остаточных напряжений зависит не только от коэффициента α_2/α_1 , но и от длины соединения.

Важнейшей задачей при диффузионной сварке соединений по охватываемым поверхностям является обеспечение контакта между свариваемыми деталями в процессе нагрева и выдержки соединения, а также охлаждение без разрушения до нормальной температуры. Проведенный численный эксперимент позволил определить зависимости и проанализировать влияние различных параметров на условие обеспечения контакта и величину остаточных напряжений. В результате можно сделать следующие выводы.

1. Геометрические параметры соединения d_2/d_1 и d_4/d_3 должны обеспечить величину сборочного натяга, достаточную для получения требуемого давления в контакте при температуре сварки;

2. Отношение коэффициентов линейного температурного расширения материалов свариваемых деталей должно находиться в пределах $\alpha_2/\alpha_1 = 0.8...1.2$, так как большие значения приводят к образованию зазора при нагреве, а меньшие — к разрушению соединения при остывании.

3. Ни один из параметров, кроме α_2/α_1 , не приводит к отставанию в процессе нагрева.

4. Полученные результаты показывают, что во время нагрева при условии наличия контакта между деталями хотя бы у одной из них есть пластические деформации. Это необходимое условие, обес-

печивающее рост фактической площади контакта и получение качественного соединения.

4. Для получения соединений из разнородных материалов по охватываемым поверхностям с $\alpha_2/\alpha_1 > 1.2$ или $\alpha_2/\alpha_1 < 0.8$ необходимо применять специальные технологические приемы, например наружную или внутреннюю обоймы [7]. При этом определение зависимостей величины давления от различных параметров требует дополнительных исследований. Однозначно можно сказать, что коэффициент α_2/α_1 оказывает решающее влияние на возможность получения качественного соединения.

1. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976.—312 с.
2. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1986.—280 с.
3. Кузьменко В. И., Чернецкий С. А. К решению задач нелинейного программирования, возникающих при численном исследовании контактного взаимодействия деформируемых тел // Устойчивость и прочность элементов конструкций: Сб. науч. тр., 1980.—С. 10—17.
4. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1980.—493 с.
5. Подгорный А. Н., Марченко Г. А., Пустынников В. И. Основы и методы прикладной теории упругости. — Киев: Вища школа, 1981.—328 с.
6. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. — М.: Высш. школа, 1970.—288 с.
7. Соединение труб из разнородных материалов / С. Н. Киселев, Г. Н. Шевелев, В. В. Рошин и др. — М.: Машиностроение, 1981.—176 с.

MATHEMATICAL MODELLING OF PROCESS OF DIFFUSION WELDING OF JUNCTIONS WITH CONTACT DEVELOPED SURFACES

S. A. Chernetskii, E. V. Karpovich

We present the mathematical model of the processes occurring in the diffusion welding of details from heterogeneous materials on developed surfaces and the realization of the model by the finite element method. The numerical experiment results are presented and recommendations for the choice of geometric, mechanical and heat physical properties of welded materials are proposed.