

Численные методы расчета судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1977. – 280 с.
5. Справочник по строительной механике корабля / Под ред. Ю.А. Шиманского: В 3 т. – Л.: Судпромгиз, 1960. – Т. 3. – 800 с.

Поступила в редколлегию 29.06.07

УДК 621.791.754.5

Л 33

Ю.М. Лебедев, проф., д-р техн. наук;

В.А. Мартыненко, ассист. каф. свар. производства

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА СТАЛИ ДУГОЙ С УГОЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Выполнены исследования по стабильности горения дуги с угольным электродом на переменном и постоянном токе. Изучено влияние напряжения холостого хода на величину тока в дуге в зависимости от ее длины и добавок K_2CO_3 , а также погонной энергии при прогреве стали на геометрические характеристики зоны нагрева.

Виконано дослідження стабільності горіння дуги з вуглецевим електродом на змінному та постійному струмі. Вивчено вплив напруги холостого ходу на величину струму в дузі залежно від її довжини та домішок K_2CO_3 , а також погонної енергії при прогріванні сталі на геометричні характеристики зони нагрівання.

The researches on arc flaming stability by means of coal electrode at temporal and constant current were carried out. The influence of throwaway motion voltage on the current depending on arc length was studied. There was also studied the influence of current power and running energy while the warming of heat areas in order to find out the geometrical characteristics; and also the influence of K_2CO_3 additive during the process.

Постановка проблемы. При поверхностном упрочнении, послесварочной термической обработке зоны термического влияния (ЗТВ) закаливающихся сталей и обработке сварных швов для снижения напряжений все большее распространение получают локальные источники нагрева [1, 2, 4, 5].

Одним из доступных и эффективных локальных источников тепла является дуга с неплавящимся электродом (плазменная струя, дуга с вольфрамовым или угольным электродом). Среди преимуществ неплавящегося угольного электрода следует отметить стабильное горение дуги, малое катодное напряжение, низкую стоимость электрода и простоту эксплуатации.

Процессы нагревания и охлаждения металла при термической обработке угольной дугой определяются воздействием высококонцентрированных

источников теплоты и условиями отвода теплоты от областей действия источников. Для эффективного использования дуги с угольным электродом необходимо располагать сведениями об особенностях ее горения, о влиянии параметров режима на нагрев металла.

Цель работы – исследование влияния режимов и условий горения угольной дуги на форму прогрева и протяженность зоны термического влияния, а также определение оптимальных параметров поверхностной и других видов обработки конструкционных сталей.

Основная часть. Наиболее часто дуга с угольным электродом применяется на постоянном токе при прямой полярности. В таком случае дуга длиной более 4 мм не производит науглероживания нагретого металла. При обратной полярности электрод сильно разогревается на большой длине, его испарение увеличивается и острый конец быстро притупляется. Дуга при обратной полярности неустойчива и не может быть растянута более чем на 10...12 мм.

Ширина и глубина прогрева локальным источником определяется эффективной мощностью источника нагрева и распределением его теплового потока, а также зависит от теплофизических свойств нагреваемого металла.

В общем случае удельный тепловой поток дуги по мере удаления от оси нагрева изменяется по закону, близкому к нормальному распределению по кривой вероятности Гаусса [3].

На устойчивость горения дуги большое влияние оказывают ее длина и напряжение холостого хода источника питания (рис. 1). При длине 3...4 мм возбуждение дуги и устойчивое горение наблюдаются при минимальном напряжении холостого хода 60 В. При этом величина сварочного тока составляет 35...50 А. При длине дуги 8 мм минимальное напряжение холостого хода, обеспечивающее возбуждение

и устойчивое горение дуги, составляет 68 В.

С увеличением напряжения холостого хода возрастает величина тока. Ток тем больше, чем меньше длина дуги. При напряжении холостого хода 72 В величина тока достигает 110 А и становится независимой от длины дуги в пределах 3...8 мм. С увеличением длины дуги с 3 до 8 мм напряжение на ней возрастает от 20 до 30 В.

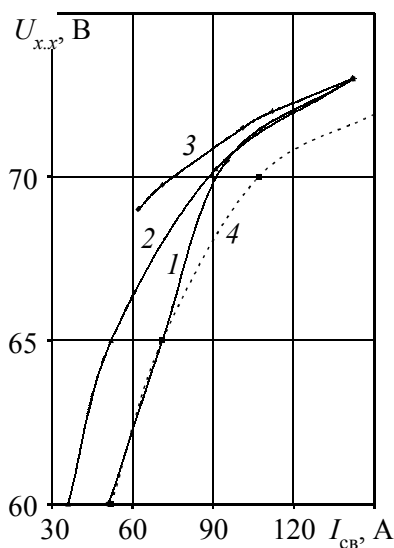


Рис. 1. Влияние напряжения холостого хода источника питания при нагреве стали угольным электродом на прямой полярности:

$I - I_d = 3$ мм; 2 – 4 мм; 3 – 8 мм; 4 – 4 мм – стальная пластина с покрытием K_2CO_3

Повышение устойчивости горения дуги достигается введением в столб дуги компонентов, содержащих легкоионизирующие вещества (К, Na). Для дуги с угольным электродом можно применить покрытие поверхности металла слоем из соединения указанных компонентов. Так, покрытие поверхности стали тонким слоем поташа K_2CO_3 при длине дуги 4 мм снижает ее напряжение с 25 до 17 В и приводит к возрастанию силы сварочного тока (рис. 1, кривая 4).

Особенность влияния K_2CO_3 на процессы, происходящие в дуговом разряде, исследовали осциллографированием тока и напряжения при нагреве стальной пластины дугой переменного тока. На цифровом осциллографе "USB-осциллограф" были записаны две осциллограммы для прогрева без нанесенного поташа и с нанесенным (рис. 2, *а, б* соответственно). При обработке напряжение на дуге составляло 25...26 В, величина тока достигала 110 А и длина дуги была в пределах 3 мм.

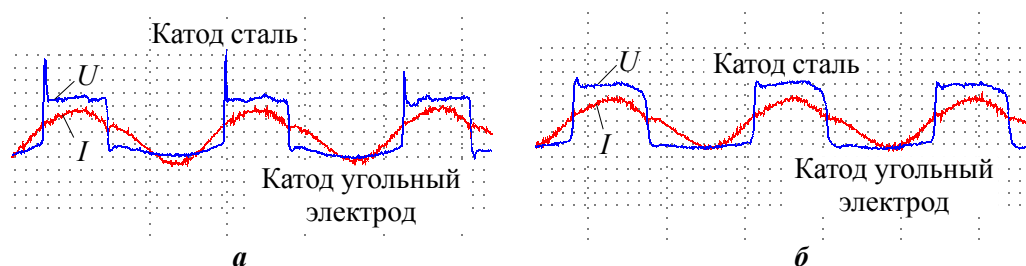


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на дуге при обработке на переменном токе стальной пластины (*а*) и стальной пластины с покрытием K_2CO_3 (*б*)

Сравнение результатов показало, что добавка K_2CO_3 позволяет повысить значения тока и уменьшить напряжение на дуге и напряжение возбуждения при смене полярности. Это, в свою очередь, дает возможность стабилизировать процесс.

Влияние угольной дуги на геометрические характеристики проплавления исследовалось путем прогрева пластин из стали Ст3 толщиной 6 мм и размерами 100×100 мм с последующим изготовлением микрошлифов для металлографического анализа. По микрошлифам определялась глубина $h_{\text{тл}}$ и ширина $b_{\text{тл}}$ проплавления металла, а также глубина $h_{\text{А1}}$ и ширина $b_{\text{А1}}$ прогрева до максимальной температуры критической точки $A_{\text{с1}}$.

Результаты исследований для длины дуги 3...4 мм и скорости нагрева 22,5 м/ч приведены на рис. 3, *а*. Из рисунка (кривые 1–4) видно, что в диапазоне сварочных токов от 60 до 150 А глубина проплавления изменяется от 0,8 до 2,5 мм, а ширина шва – от 3,0 до 5,2 мм.

Коэффициент формы провара $\psi = b/h$ с увеличением сварочного тока уменьшается: при силе тока 60 А он составляет 3,7, а при 150 А – 2,1. Ширина зоны термического влияния по оси прогрева практически не за-

висит от сварочного тока для исследованного диапазона его изменения и равна 0,9...1,0 мм. Вблизи поверхности пластины сварочный ток оказывает существенное влияние на ЗТВ: при токе 60 А она равна 0,5 мм, а при 150 А увеличивается до 1,9 мм. Если ввести коэффициент формы прогрева до критической точки A_{c1} , рассчитываемый аналогично коэффициенту формы провара, то для исследуемых режимов нагрева он будет изменяться от 2,3 до 2,6.

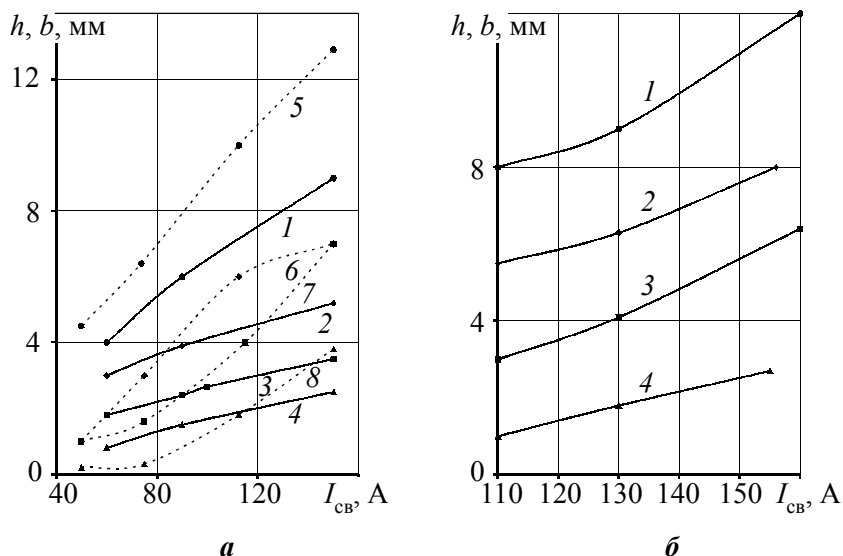


Рис. 3. Влияние силы сварочного тока дуги постоянного (а) и переменного (б) тока с угольным электродом на геометрические характеристики прогрева стальной пластины:

1 - $h_{тл}$; 2 - $b_{тл}$; 3 - h_{A1} ; 4 - b_{A1} ; 5 - 8 - $h_{тл}$, $b_{тл}$, h_{A1} , b_{A1} соответственно, с покрытием K_2CO_3

Таким образом, в ходе исследования установлено, что угольная дуга, горящая на воздухе, является распределенным источником нагрева и не обеспечивает симметричность прогрева стали до проплавления и границы ЗТВ.

При нанесении на поверхность стальной пластины тонкого слоя K_2CO_3 резко увеличивается стабильность горения дуги и снижается напряжение с 20 до 17 В (см. рис. 3, а, кривые 5–8). Добавление стабилизирующего компонента существенно изменяет характеристики нагрева. Так, глубина проплавления при токах 50 и 75 А составляет соответственно 0,1 и 0,3 мм при ширине 1...3 мм. Глубина прогрева до температуры A_{c1} для этих режимов достигает 1 и 3 мм. При токе 110 и 150 А резко увеличивается глубина проплавления: до 1,7 и 3,7 мм соответственно при ширине 6 и 7 мм.

Из значений коэффициента формы провара видно, что добавка K_2CO_3 резко рассредоточивает тепло по поверхности: для малых токов до 75 А

($\psi = 10$), а при большом токе (150 А) это влияние практически пропадает ($\psi = 1,9$).

Ширина ЗТВ составляет 1,0 и 1,2 мм по оси шва для токов 50 и 75 А, а вблизи поверхности нагрева – 1,5 мм. При 110 А она достигает 2 мм как по оси прогрева, так и вблизи поверхности.

Таким образом, добавка стабилизирующего компонента K_2CO_3 на поверхность стальной пластины переводит угольную дугу в поверхностный источник нагрева при малых токах. При высоком значении тока этот эффект не наблюдается.

Исследования условий горения дуги угольный электрод–стальная пластина на переменном токе показали, что при напряжении холостого хода 60 В, характерного для сварочных трансформаторов, стабильное горение дуги при скорости перемещения электрода 10...15 м/ч наблюдается лишь при длине дуги 2...4 мм и токе 110...180 А. При этом напряжение дуги изменяется от 25 до 32 В. Добавка легкоионизирующего компонента путем нанесения на стальную пластину K_2CO_3 незначительно уменьшает напряжение дуги и несколько увеличивает силу сварочного тока.

Результаты исследований геометрических характеристик прогрева стальной пластины угольной дугой на переменном токе приведены на рис. 3,б. Глубина проплавления стали при изменении тока от 115 до 155 А увеличивается от 1,1 до 2,7 мм. При этом ширина проплавления изменяется соответственно от 5,6 до 8,0 мм. Глубина прогрева до критической точки A_{c1} составляет 3 мм для тока 115 А, 4 мм для 130 А и более 6 мм для 155 А. Ширина нагрева до температуры A_{c1} по поверхности пластины при этих условиях изменяется от 8 до 12 мм.

Покрытие стальной пластины K_2CO_3 увеличивает ток от 130 до 180 А и ведет к снижению глубины проплавления. При токе 130 А она составляет 1,1 мм, а при 180 А – 1,3 мм, что уменьшает ширину прогрева.

Коэффициент формы провара для дуги на воздухе с увеличением силы тока уменьшается от 5 до 3, а коэффициент формы прогрева до критической температуры A_{c1} – с 3 до 2. Металлографические исследования прогретых пластин показали значительное насыщение углеродом металла шва, полученного прогревом дугой с угольным электродом на переменном токе. При постоянном токе прямой полярности эффект насыщения углеродом расплавленной стали практически отсутствует.

Таким образом, угольная дуга при прогреве стали на переменном токе малоэффективна и может привести к значительному изменению химического состава поверхностного слоя металла. Ее можно использовать для нагрева при поверхностной закалке лишь в случаях, когда применение постоянного тока невозможно из-за отклонения дуги в сторону основного металла под действием магнитного поля.

При малых значениях полной тепловой мощности дуги источник нагре-

ва является распределенным и по мере увеличения мощности приближается к сосредоточенному. Поэтому при малой погонной энергии прогрева стали угольной дугой для расчета термических циклов металла ЗТВ нужно использовать формулы для распределенных источников нагрева.

На основании формул Н.Н. Рыкалина [3] для прогрева поверхности полубесконечного тела и сквозного прогрева тонких пластин авторами получены простые расчетные выражения в предположении действия быстро движущихся нормально-круговых источников.

Точность расчетов распределения тепла при нагреве локальными источниками во многом определяется правильным выбором исходных данных. При выводе аналитических зависимостей, полученных решением дифференциального уравнения теплопроводности, приняты определенные допущения. Предполагается, что теплофизические характеристики нагреваемого материала постоянные для всего рассматриваемого интервала температур от $T_{пл}$ до начальной температуры изделия. Так, при нагреве и сварке низкоуглеродистых сталей принимают коэффициент теплопроводности равным 0,38...0,42 Дж/(см·с·град), коэффициент температуропроводности – 0,075...0,09 см²/с, а теплоемкость единицы объема стали – 4,9...5,2 Дж/(см³·град).

Необходимо также правильно вычислить эффективную тепловую мощность q , которая для дуги определяется произведением тока на падение напряжения в дуге и на эффективный КПД нагрева источника η . Эффективный КПД нагрева дугой зависит от рода тока, полярности, а также теплофизических свойств нагреваемого материала, параметров режима горения дуги и скорости перемещения источника. Были выполнены исследования по калориметрическому определению η для различных режимов нагрева стальных пластин дугой с угольным электродом на переменном токе и постоянном токе прямой полярности.

Результаты показали, что при прогреве стальной пластины дугой с угольным электродом на постоянном токе прямой полярности эффективный КПД нагрева практически остается постоянным для исследованных режимов и составляет в среднем 0,65. Покрытие поверхности стальной пластины ионизирующим компонентом K_2CO_3 повышает устойчивость горения дуги и слабо влияет на эффективный КПД нагрева. При обработке на переменном токе КПД нагрева угольной дугой резко уменьшается и составляет 0,35.

Полученные значения эффективного КПД нагрева позволили рассчитать эффективную тепловую мощность прогрева и погонную энергию ($q_{п} = q/v_{св}$) и оценить точность применяемых расчетных схем теории распространения тепла при сварке.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений T_m (рис. 4,а) показывает, что теоретическое предположение дуги как сосредоточенного источника возможно лишь для погонной энергии прогрева около 4 кДж/см. При более низких значениях $q_{п}$ источник следует рассматривать как рас-

пределенный. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по проплавлению при возрастании $q_{\text{п}}$ свыше 4 кДж/см обусловлено погружением дуги в металл.

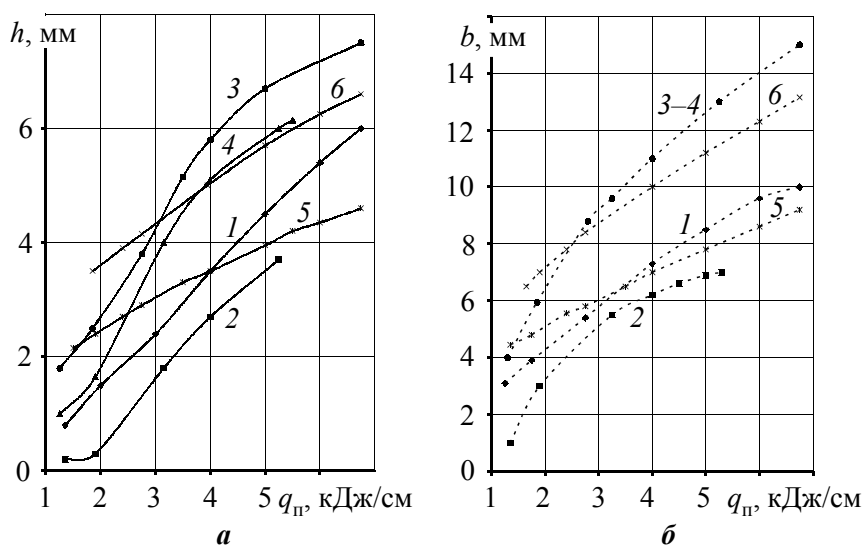


Рис. 4. Влияние погонной энергии дуги с угольным электродом на глубину (а) и ширину (б) прогрева пластины:

1 – прогрев стали на воздухе; 2 – прогрев стали с K_2CO_3 ; 3 – прогрев стали до A_{c1} на воздухе; 4 – прогрев стали до A_{c1} с K_2CO_3 ; 5 – расчетная кривая прогрева (быстродвижущийся точечный источник тепла); 6 – расчетная кривая прогрева до A_{c1}

Аналогичная закономерность наблюдается и при сравнении расчетных и экспериментальных данных по влиянию погонной энергии на ширину зон прогрева (рис. 4, б). Однако здесь расчетные и экспериментальные значения близки для погонных энергий прогрева 3,0...3,5 кДж/см.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что глубина и ширина прогрева стали угольной дугой на постоянном токе прямой полярности до температур критической точки A_{c1} может быть оценена расчетным методом по формуле быстродвижущегося точечного источника на поверхности массивного изделия

$$h_{A_1}^{b/2} = \sqrt{\frac{0,368q}{\frac{\pi}{2} c \gamma A_{c1}}}.$$

Наиболее высокая точность при этих расчетах достигается для погонной энергии нагрева около 3 кДж/см. Для диапазона 1,75...6,0 кДж/см погрешность в расчетах по сравнению с экспериментальными значениями не превышает 15 %. Причем для погонных энергий прогрева менее 3 кДж/см

расчет дает несколько завышенный результат, а при более высоких значениях расчетные величины h и b ниже опытных. При этом глубина и полуширина зоны прогрева до критической температуры A_{c1} для указанного диапазона погонных энергий изменяется от 2,5 до 7,0 мм.

Применение покрытий поверхности стали легкоионизирующим компонентом K_2CO_3 , которое ведет к повышению устойчивости горения дуги и защищает расплавленный металл от воздействия воздуха, не изменяет ширину зоны нагрева, но уменьшает на 1 мм глубину прогрева до температур критической точки A_{c1} .

Для оценки влияния погонной энергии угольной дуги на глубину и ширину зоны нагрева до температур критических точек A_{c1} и A_{c3} можно также воспользоваться опытными данными, приведенными на рис. 5.

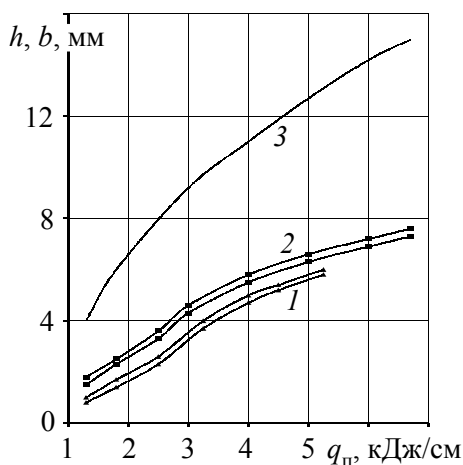


Рис. 5. Влияние погонной энергии нагрева дугой с угольным электродом на постоянном токе прямой полярности на глубину h и ширину b прогрева стали до температур критических точек A_{c1} – A_{c3} :

1 – глубина прогрева стали с покрытием поверхности K_2CO_3 ; 2 – глубина прогрева стали без покрытия; 3 – ширина прогрева поверхности стальной пластины

Выводы. 1. Установлена прямая зависимость влияния напряжения холостого хода на сварочный ток: возрастание значения тока тем больше, чем меньше длина дуги. 2. Покрытие поверхности стали тонким слоем поташа K_2CO_3 снижает напряжение дуги и приводит к возрастанию силы сварочного тока; переводит угольную дугу в поверхностный источник нагрева при малых величинах тока; при значительном токе этот эффект пропадает. 3. Применение покрытий поверхности стали легкоионизирующим компонентом K_2CO_3 , которое ведет к повышению устойчивости горения дуги и защищает расплавленный металл от воздействия воздуха, существенно не изменяет ширину зоны нагрева, но уменьшает глубину прогрева на 1 мм. 4. Наиболее экономичен нагрев при упрочнении угольной дугой на постоянном токе прямой полярности. Он обеспечивает наиболее устойчивое горение дуги, позволяет плавно регулировать параметры режимов нагрева в широких пределах и обладает наиболее высоким КПД (в среднем 65 %). 5. Применение дуги с неплавящимся угольным электродом является обоснован-

ным для поверхностной термической обработки стали и снижения концентрации напряжений сварных швов.

Список использованной литературы. 1. Аснис А.Е., Иващенко Г.Л. Повышение прочности сварных конструкций. – К.: Наук. думка, 1985. – 280 с. 2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самогутин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – К.: Техніка, 1990. – 109 с. 3. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1952. – 296 с. 4. Савицкий М.М., Кулик В.М., Бурский Г.В. Особенности дуговой обработки закаливающих сталей без расплавления // Автоматическая сварка. – 2000. – № 5. – С. 31–36. 5. Самогутин С.С. Комбинированное индукционно-плазменное упрочнение инструментальных сталей // Сварочное производство. – 2000. – № 7. – С. 25–28.

Поступила в редколлегию 30.08.07

УДК 621.791

К 32

В.В. Квасницкий, доц., канд. техн. наук

НТУУ КПИ, г. Киев

Г.В. Ермолаев, доц., канд. техн. наук;

М.В. Матвиенко, асп. каф. свар. производства

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УЗЛАМ ЦИЛИНДР–ЦИЛИНДР И ВТУЛКА–ВТУЛКА

Установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке деталей из разнородных материалов в виде цилиндров и втулок в условиях изменения температуры.

Установлено закономірності формування напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні деталей з різнорідних матеріалів у вигляді циліндрів та втулок в умовах зміни температури.

It has determined regularities of stress-deformed mode formation at diffusion welding of details from dissimilar metals such as cylinders and bushes during thermocycle.

Постановка проблемы. Для изготовления цилиндрических деталей из разнородных металлов часто используется диффузионная сварка в вакууме [2]. При определении давления сжатия – одного из основных параметров режи-