

ПРОЦЕССЫ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ СВАРОЧНОГО ТОКА (Обзор).

Часть II. Эффекты дугового воздействия на свариваемый металл

У. Бон¹, И.В. Кривцун²

¹Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен обзор работ, посвященных процессам сварки неплавящимся электродом в инертном газе с модуляцией сварочного тока. Вторая часть обзора посвящена анализу работ, в которых рассматриваются особенности проплавления металла (алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, никель-хромовые жаропрочные сплавы) и формирования швов при TIG сварке модулированным током. Библиогр. 12, табл. 16, рис. 19

Ключевые слова: дуга с тугоплавким катодом, TIG сварка, свариваемый металл, проплавление, сварной шов, модуляция сварочного тока, импульс, частота, коэффициент заполнения, амплитуда

Особенности горения нестационарной дуги при сварке неплавящимся электродом с модуляцией тока, описанные в первой части данного обзора [1], вызывают значительные изменения характеристик теплового и динамического воздействия дуги на свариваемый металл, а, следовательно, процессов его проплавления и формирования швов по сравнению с соответствующими процессами при TIG сварке на постоянном токе.

Работа [2] является одним из первых исследований, посвященных сравнительному анализу качества и механических свойств сварных швов, полученных при однопроходной TIG сварке образцов из алюминиевого сплава 2219 толщиной 0,125; 0,250; 0,350 дюйма (3,2; 6,4 и 8,9 мм) на постоянном токе прямой полярности и с его импульсной модуляцией. При проведении экспериментов использовались два источника питания – для высокочастотной (ВЧИ) и низкочастотной (НЧИ) импульсной модуляции сварочного тока. Первый из них обеспечивал ВЧИ модуляцию тока прямоугольными импульсами до значения 500 А, с частотой следования $f = 2 \dots 25$ кГц и регулируемым коэффициентом заполнения δ в диапазоне от 20 до 80 %, что позволяло варьировать среднее значение тока от 100 до 400 А. Второй источник обеспечивал дополнительную НЧИ модуляцию высокочастотного тока дуги прямоугольными импульсами с частотой 1...10 Гц и коэффициентом заполнения 10...100 %. Ток подставки во всех случаях был равен 3 А. Следует отметить, что кроме подачи однополярных импульсов тока такая система позволяет также реализовать модуляцию сварочного тока (в том числе комбинированную) импульсами прямой и обратной полярности.

Кривцун И.В. – <http://orcid.org/0000-0001-9818-3383>
©У. Бон, И.В. Кривцун, 2019

На всех образцах выполнялись наплавочные и стыковые швы (в нижнем положении, на весу) при двух режимах модуляции тока: высокочастотном и комбинированном (высокочастотная + низкочастотная модуляция), а также при TIG сварке на постоянном токе. Полученные швы подвергались радиографическому контролю. Рентгеновские изображения анализировались при десятикратном увеличении и определялось количество дефектов (пор и оксидных включений) размером более 0,005 дюйма (0,13 мм) по всей длине шва. На рис. 1, 2 показаны зависимости длины неоднородностей (дефектов) от длины швов на образцах из алюминиевого сплава 2219 толщиной 8,9 и 3,2 мм, соответственно, при различных режимах модуляции. Приведенные на этих рисунках экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение ВЧИ модуляции тока существенно (до 80 %) снижает количество пор и неметаллических включений на единицу длины шва, при этом

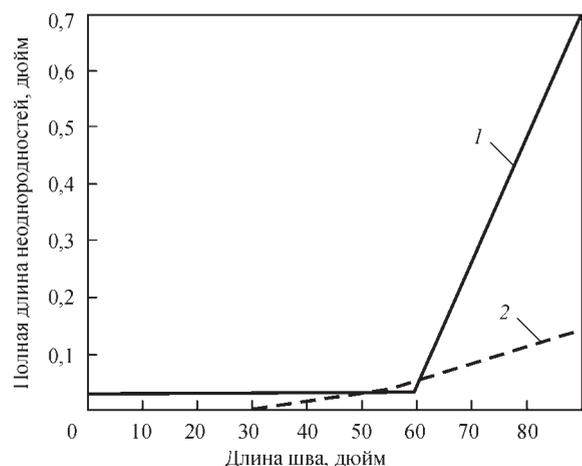


Рис. 1. Полная длина неоднородностей (дюймов) в зависимости от длины шва (дюймов) при TIG сварке образцов толщиной 8,9 мм на постоянном токе (1) и с ВЧИ модуляцией тока (2) [2]

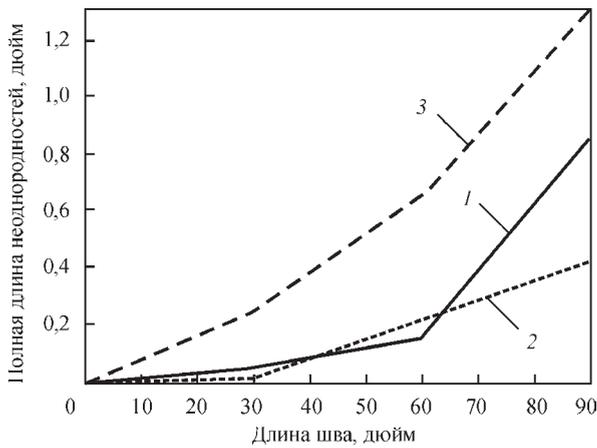


Рис. 2. Повна довжина неоднородностей в залежності від довжини шва при TIG зварці образців товщиною 3,2 мм на постійному тоці (1), с ВЧИ модуляцією тоці (2) і с комбінованою модуляцією (3) [2]

використання комбінованого режиму помітно погіршує цей показник.

Автором [2] показано, що високочастотна імпульсна модуляція зварочного тоці може також ефективно використовуватися для руйнування неоднорідної литої структури металу, спостережуваної в швах, виконаних зваркою неплавлячим електродом на постійному тоці. В результаті мікроструктура металу швів при зварці алюмінієвого сплаву 2219 з ВЧИ модуляцією тоці являється однорідною як в продольному, так і в поперечному сеченні зварочного шва. Тому такі шви характеризуються значеннями в'язкості руйнування на 10...15 % вище, ніж при TIG зварці на постійному тоці.

Низькочастотна модуляція тоці дуги в поєднанні з високочастотною не приводить до формування однорідної мікроструктури в зварних швах на алюмінієвому сплаві 2219. Вона може бути використана тільки для управління геометрією шва при однопрохідній TIG зварці образців товщиною 0,125 дюйма (3,2 мм) з вільним формуванням. Це дозволяє якісно зварювати більш тонкі матеріали, що забезпечує зниження ваги зварної конструкції.

В роботі [3] експериментально досліджено вплив п'яти параметрів режиму TIG зварки образців з нержавіючої сталі з низькочастотною (1...5 Гц) модуляцією тоці прямокутними імпульсами, а саме: амплітуди (глибини) і ча-

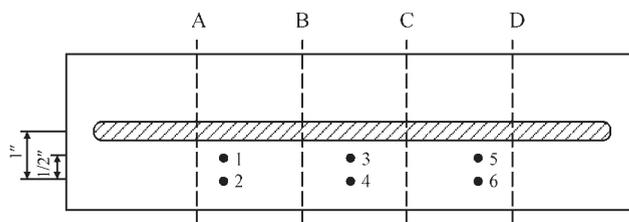


Рис. 3. Розташування термопар на поверхні зразка: точки 1, 3, 5 на відстані 1/2 дюйма (12,7 мм); 2, 4, 6 – 1 дюйм (25,4 мм) від середньої лінії шва [3]

стоти модуляції тоці, коефіцієнта заповнення і максимального значення тоці, а також швидкості зварки на глибину проплавлення, коефіцієнт форми шва і термоцикли в зварюваному металі. Для аналізу такого впливу при трьох рівнях значень вказаних параметрів, наведених в табл. 1, методом математичного планування експеримента було вибрано 46 їх комбінацій, для яких були проведені натурні експерименти.

При проведенні всіх експериментів використовувалася водоохладжуєма зварочна горелка з тугоплавким катодом з торированного вольфраму діаметром 3/32 дюйма (2,38 мм), довжина дуги встановлювалася рівною 0,05 дюйма (1,27 мм), в якості захисного газу використовувалася суміш 75%He + 25%Ar. Виконувалися наплавочні шви на зразках з нержавіючої сталі 304 товщиною 1/4 дюйма (6,35 мм), довжина всіх швів була однаковою і рівною 10 дюймів (25,4 см). Температура вимірювалася термопарами хромель-алюмель в шести точках поверхні зразка, показаних на рис. 3.

Характерні часові залежності температури в відповідних точках показані на рис. 4, при цьому максимальні значення температури в точках 1, 3, 5, а також в точках 2, 4, 6 виявляються практично однаковими.

Вимірянні значення максимальної температури в вибраних точках ставилися в відповідності до погонної енергії X (Дж/дюйм) процесу зварки, яка в разі імпульсної модуляції тоці вивчалася наступним чином $X = 0,6U[I_H\delta + I_L(100 - \delta)]/S$, де U – напруга на дугі, яке вибиралося постійним (не залежним від значень тоці в паузі і максимального тоці) і рівним 11,75 В, а позначення інших параметрів і їх розмірності відповідають використаним в табл. 1. Приведені на рис. 5 залежності максимальних значень температури в точках 1, 3, 5 і, відповідно, 2, 4, 6 від погонної енергії процесу

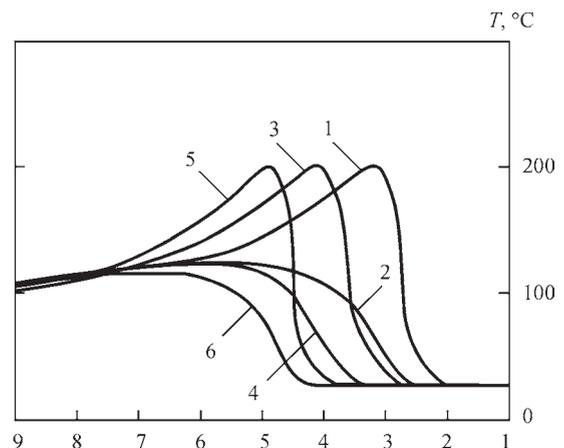


Рис. 4. Термоцикли в різних точках поверхні зразка [3]

Таблиця 1. Параметри досліджуваних режимів зварки [3]

Параметр	Значення		
Глибина модуляції току I_L/I_H , %	80	50	20
Частота модуляції f , Гц	5	3	1
Коефіцієнт заповнення δ , %	75	50	25
Максимальне значення току I_H , А	175	125	75
Швидкість зварки S , дюйм/мин	9	6	3

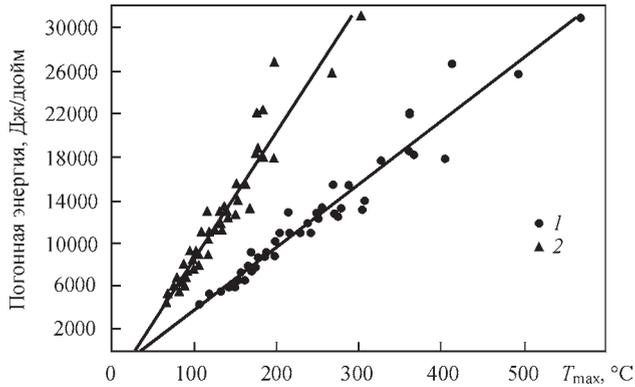


Рис. 5. Залежність від погонної енергії максимальних значень температури в точках, знаходячись на відстані 1/2 дюйма від середньої лінії шва (1) і в точках, знаходячись на відстані 1 дюйм (2) [3]

са свідчать про лінійність вказаних залежностей у всьому досліджуваному діапазоні параметрів режиму зварки.

На основі отриманих експериментальних даних були побудовані рівняння регресії для розрахунку глибини проплавлення h і її відношення до ширини шва h/b як функцій розглянутих параметрів режиму зварки. Рівняння регресії, запропоновані авторами для визначення глибини проплавлення, показує, що основну роль при цьому грає швидкість зварки S , далі йде амплітуда модуляції I_L/I_H і максимальне значення току I_H , потім коефіцієнт заповнення δ і, нарешті, частота f . Побудовані з допомогою даного рівняння лінії постійної глибини проплавлення h в змінних $S - I_H$ представлені на рис. 6. На цьому ж малюнку показані лінії постійних значень погонної енергії X , розраховані як вказано вище. Що стосується рівняння регресії для розрахунку відношення глибини проплавлення до ширини шва, то головну роль тут грає максимальне значення току I_H , далі йде швидкість зварки S , далі йде амплітуда модуляції I_L/I_H , частота f і коефіцієнт заповнення δ .

Приведені на рис. 6 розрахункові дані дозволяють, наприклад, визначати оптимальні комбінації I_H і S , відповідні мінімальному значенню погонної енергії, необхідної для досягнення будь-якої заданої глибини проплавлення. В частині, найкраща комбінація вказаних параметрів режиму зварки для досягнення глибини проплавлення $h = 0,09$ дюйма (2,29 мм)

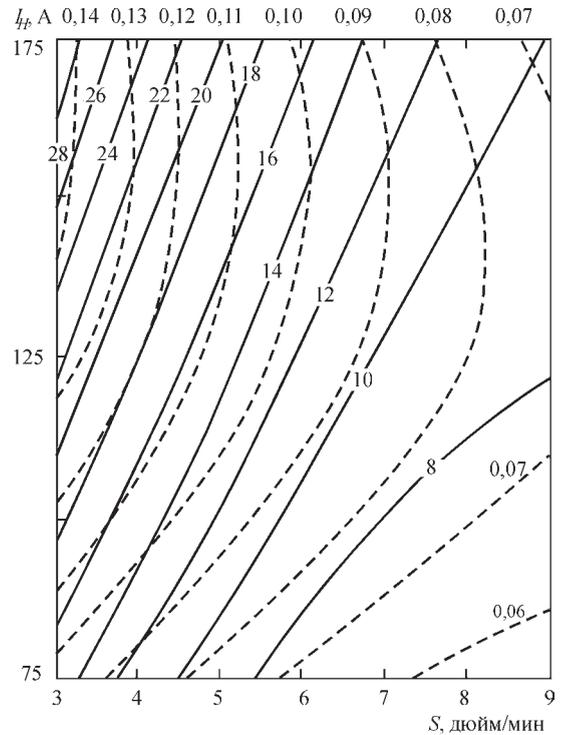


Рис. 6. Лінії постійних значень глибини проплавлення (штрихові криві, цифрами вказані значення h в дюймах) і погонної енергії (сплошні криві, цифрами вказані значення X , кДж/дюйм) при $\delta = 75\%$; $I_L/I_H = 20\%$; $f = 1$ Гц [3] єсть $I_H = 115$ А, $S = 6$ дюйм/мин, при цьому мінімально необхідне значення X становить приблизно 10 кДж/дюйм.

С допомогою такого підходу було проаналізовано 27 комбінацій параметрів режиму зварки. Отримані дані для ТІГ зварки на постійному тоці, а також при трьох комбінаціях значень коефіцієнта заповнення δ і амплітуди модуляції I_L/I_H представлені на рис. 7.

Завершивши розгляд роботи [3], необхідно відзначити важливий висновок, до якого приходять автори, а саме, при будь-яких комбінаціях параметрів режиму ТІГ зварки з НЧІ модуляцією току глибина проплавлення і її відношення до ширини шва виявляються більшими, ніж у випадку зварки на постійному тоці, при тому ж значенні погонної енергії.

Робота [4] присвячена експериментальним дослідженням процесів ТІГ і плазменної зварки з використанням низькочастотної (1...40 Гц) і високочастотної (2...20 кГц) імпульсної модуляції зварочного току, а також комбінованої модуляції (10 Гц + 2 кГц). У всіх експериментах по ТІГ зварці використовувалась горелка з вольфрамовим (W+2%Th) катодом діаметром 3/32 дюйма (2,36 мм), що має кут заточки робочого кінця 60°, довжина дуги встановлювалась рівною 3/32 дюйма (2,36 мм), як захисний газ використовувався аргон. Проводилась зварка зразків зі сплаву Інконель 600 товщи-

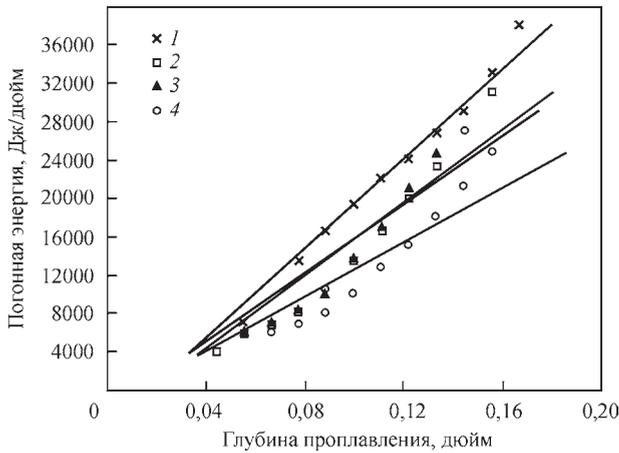


Рис. 7. Минимально возможные значения погонной энергии процесса TIG сварки нержавеющей стали в зависимости от достигаемой глубины проплавления для сварки на постоянном токе (1) и трех режимов с импульсной модуляцией тока дуги: $\delta = 50\%$, $I_L/I_H = 80\%$ (2); 25% и 80% (3); 75% и 20% (4) [3]

ной 0,109 дюйма (2,77 мм), скорость сварки выбиралась постоянной, равной 4 дюйма в минуту (1,69 мм/с). Питание дуги осуществлялось от двух источников, один из которых был предназначен для низкочастотной модуляции тока, а второй, транзисторный, – для высокочастотной.

Поскольку результаты исследования влияния низкочастотной импульсной модуляции сварочного тока на глубину и форму проплавления металла описаны выше (см. работу [3]), рассмотрим данные работы [4], касающиеся TIG сварки с высокочастотной импульсной модуляцией тока дуги. Для корректного сравнения глубины проплавления h при сварке на постоянном токе с ее значением в случае ВЧИ модуляции тока дуги прямоугольными импульсами, соответствующие эксперименты проводились при одном и том же значении среднего тока $I_{av} = \frac{I_B t_B + I_P t_P}{t_B + t_P}$, где I_B , I_P – значения тока в паузе и в импульсе; t_B , t_P – длительности паузы и импульса, соответственно. На рис. 8 приведены зависимости величины h от значения тока в паузе при TIG сварке с модуляцией тока в

форме меандра ($\frac{t_P}{t_B} = 1$) при частотах модуляции $f = \frac{1}{t_B + t_P}$, равных 2, 10 и 20 кГц и среднем токе $I_{av} = 60$ А. Горизонтальной прямой показана глубина проплавления металла при сварке на постоянном токе, равном I_{av} . Как следует из приведенных на этом рисунке экспериментальных данных, глубина проплавления при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока дуги слабо зависит от частоты модуляции, заметно возрастает с ростом I_B и при $I_B > 30$ А превышает соответствующее значение для сварки постоянным током.

Для исследования влияния параметров модуляции тока на микроструктуру сварных швов, в работе [4] были проведены металлографические исследования металла шва и зоны термического влияния. В частности, было установлено, что с ростом частоты модуляции f сварочного тока размер зоны проплавления металла уменьшается, тогда как размер зоны термического влияния – увеличивается. Это свидетельствует о снижении эффективности плавления свариваемого металла (термического КПД процесса) при увеличении f . Что касается микроструктуры металла шва, то использование ВЧИ модуляции тока не приводит к заметному ее улучшению по сравнению с TIG сваркой на постоянном токе.

В работе [5] выполнены исследования влияния модуляции тока на глубину проплавления D и ширину W лицевой стороны шва при сварке образцов из нержавеющей стали 304. В случае синусоидальной модуляции тока дуги длиной 4 мм в диапазоне 30...270 А (среднее значение тока $\langle I \rangle = 150$ А) были получены зависимости от частоты модуляции глубины проплавления и ширины шва, представленные на рис. 9.

Как следует из приведенных на этих рисунках экспериментальных данных глубина проплавления в случае сварки модулированным током во всем исследованном диапазоне частот модуляции оказывается заметно выше, чем в случае сварки на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока. При этом с ростом частоты модуляции величина D монотонно возрастает, выходя на плато при частотах порядка 4 кГц. Что касается ширины шва, то в случае сварки с низкочастотной модуляцией тока ($f = 100$ Гц) она оказывается несколько больше соответствующей величины для сварки на постоянном токе, уменьшаясь с ростом частоты модуляции и выходя на постоянное

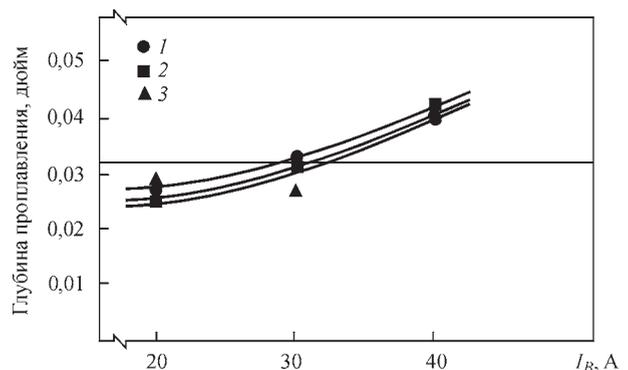


Рис. 8. Зависимость глубины проплавления от значения тока в паузе при модуляции тока прямоугольными импульсами в форме меандра с частотой следования $f = 2$ (1); 10 (2) и 20 (3) кГц и среднем значении тока $I_{av} = 60$ А, горизонтальной линией показана глубина проплавления при TIG сварке на постоянном токе $I = 60$ А [4]

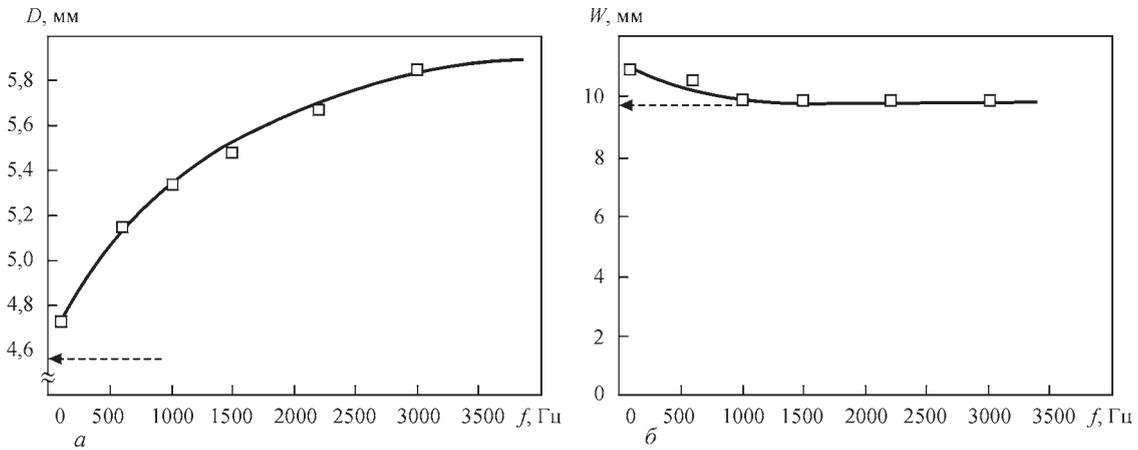


Рис. 9. Зависимости глубины проплавления (а) и ширины лицевой стороны шва (б) от частоты синусоидальной модуляции тока, штриховыми линиями показаны соответствующие значения для сварки постоянным током $I = 150$ А [5]

значение, соответствующее значению W при сварке постоянным током, при частоте порядка 1,5 кГц.

В работе [6] также приводятся данные, свидетельствующие об увеличении глубины проплавления при использовании высокочастотной модуляции тока дуги. В частности, на рис. 10 показана зависимость глубины проплавления T_N от значения тока в импульсе I_p (кривая 1) при частоте модуляции 10 кГц, токе в паузе $I_B = 5$ А и постоянном среднем значении тока дуги, равном 50 А (модуляция тока осуществлялась прямоугольными импульсами, коэффициент заполнения выбирался из условия постоянства среднего значения тока). На этом же рисунке приведены зависимости T_N от длины дуги при ТIG сварке модулированным током с частотой модуляции 10 кГц и среднем токе $\langle I \rangle = 50$ А (кривая 2), а также при сварке на постоянном токе (кривая 3), равном среднему значению модулированного тока.

Как следует из рис. 10, глубина проплавления повышается при увеличении амплитуды модуляции тока (см. кривую 1) и заметно снижается при увеличении длины дуги (см. кривые 2, 3), оставаясь существенно выше в случае модуляции тока с частотой 10 кГц по сравнению со сваркой на постоянном токе.

Кроме того, в работе [6] приводятся изображения поперечных сечений швов, выполненных ТIG свар-

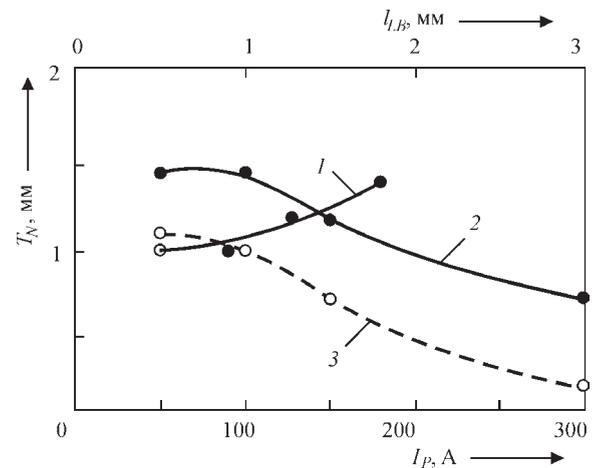


Рис. 10. Зависимости глубины проплавления T_N от значения тока в импульсе I_p (1) и от длины дуги l_{LB} (2 – 10 кГц, 3 – 0 Гц) [6] кой (защитный газ 95%Ar + 5%N₂, без присадочной проволоки) нержавеющей стали 1.4301 (AISI 304) толщиной 2 мм на постоянном токе и с ВЧИ модуляцией тока дуги. Как следует из сравнения фотографий поперечных сечений стыковых швов, представленных на рис. 11, применение ВЧИ модуляции тока дуги позволяет достичь того же результата, что и в случае сварки на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока, при существенно более высокой скорости сварки. Это свидетельствует не только о большей проплавляющей способности

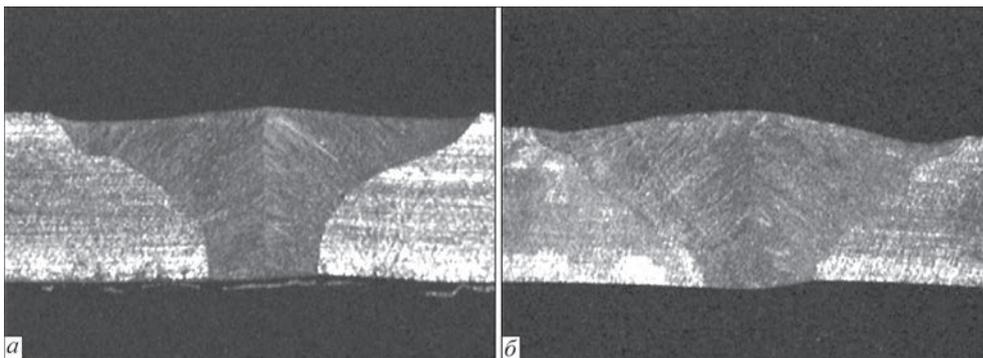


Рис. 11. Макрошлифы поперечных сечений стыковых швов, выполненных на стали 1.4301 толщиной 2 мм ТIG сваркой с ВЧИ модуляцией тока (а) и на постоянном токе (б) при следующих параметрах режимов: а – частота модуляции 6 кГц, значение тока в импульсе 375 А, средний ток 292 А, скорость сварки 2,4 м/мин; б – ток дуги 292 А, скорость сварки 1,6 м/мин [6]

Таблица 2. Состав свариваемого металла и присадочной проволоки [7]

Материал	Химический состав, мас. %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Металл	0,04	0,6	1,01	0,032	0,005	8,26	18,34	бал.
Проволока	0,013	0,35	1,88	0,024	0,003	12,65	19,63	бал.

дуги модулированного тока, но и о более высокой ее пространственной стабильности.

В работе [7], наряду с результатами экспериментальных исследований характеристик дуги с тупоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом при ВЧИ модуляции (до 20 кГц) с высоким пиковым значением тока (до 500 А), приведены данные о влиянии такой модуляции на глубину проплавления и ширину наплавочных швов, выполненных TIG сваркой, на образцах из нержавеющей стали толщиной 16 мм, в том числе с использованием присадочной проволоки диаметром 0,6 мм (химический состав используемых материалов приведен в табл. 2).

На рис. 12 представлены зависимости глубины проплавления D и ширины швов W от длины дуги L при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока (среднее и пиковое значения тока 150 и 500 А, соответственно) и при сварке постоянным током, равным среднему значению модулированного тока. Как следует из приведенных на этом рисунке экспериментальных данных ширина швов при короткой дуге ($L = 0,5$ мм) практически не зависит от частоты модуляции. С увеличением длины дуги при частоте модуляции 5 кГц величина W вначале увеличивается, затем несколько уменьшается и снова возрастает, достигая максимального значения порядка 10 мм при $L = 3$ мм (см. рис. 12, а). При частотах 10

и 16 кГц величина W немонотонно растет с увеличением длины дуги. Здесь следует отметить, что швы в случае сварки модулированным током оказываются заметно шире, чем в случае сварки на постоянном токе при той же длине дуги.

Что касается глубины проплавления при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока на частотах от 5 до 16 кГц, то величина D уменьшается при увеличении длины дуги более быстро в диапазоне $L = 0,5 \dots 1,0$ мм и более плавно при $L > 1$ мм, оставаясь заметно выше соответствующих значений для случая сварки на постоянном токе (см. рис. 12, а). При сварке с использованием присадочной проволоки описанные выше закономерности изменения величин D и W с увеличением длины дуги сохраняются (см. рис. 12).

На рис. 13 представлены формы поперечного сечения наплавочных швов, выполненных TIG сваркой нержавеющей стали (см. табл. 2) с ВЧИ модуляцией тока (среднее и пиковое значения тока – 150 и 500 А, соответственно), а также на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока. К сожалению, в работе [7] не приводятся данные о скорости сварки и скорости подачи проволоки в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 12, 13, а также не

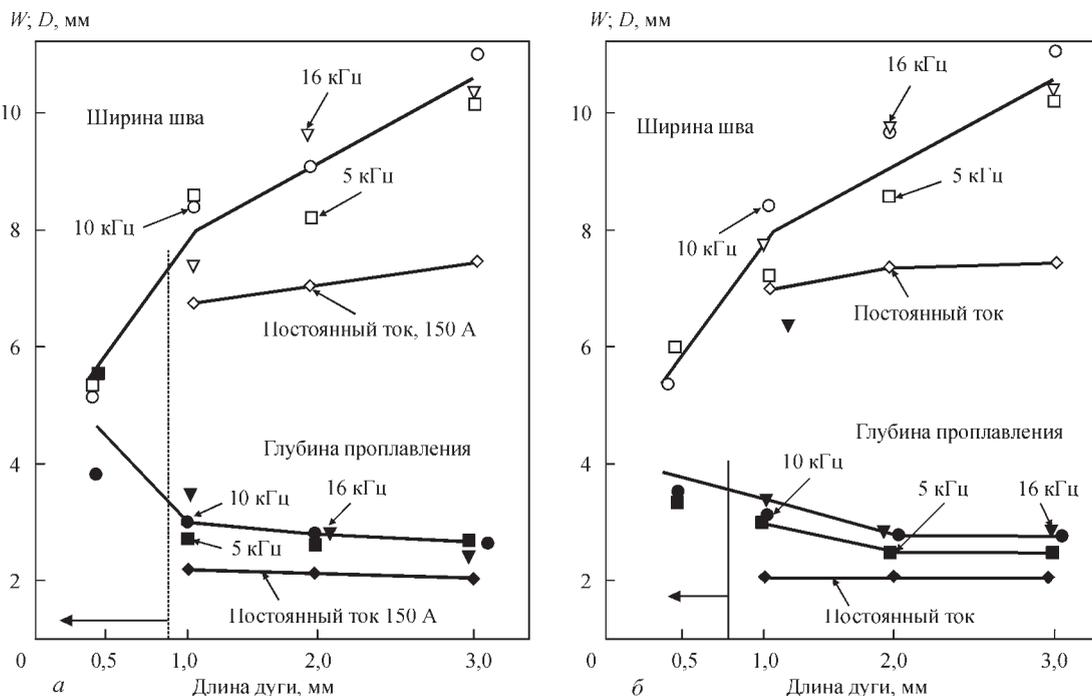


Рис. 12. Зависимости глубины проплавления и ширины шва от длины дуги при TIG сварке с модуляцией тока на частотах 5, 10 и 16 кГц (пиковое значение тока 500 А, среднее значение – 150 А) и сварке постоянным током 150 А: а – сварка без присадки; б – сварка с присадочной проволокой; горизонтальной стрелкой указана область в которой невозможна сварка на постоянном токе [7]

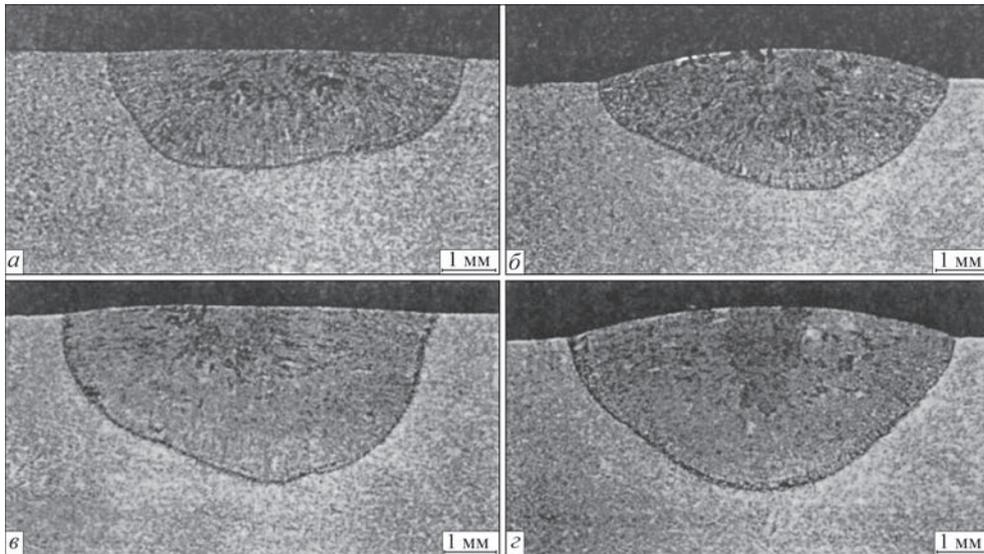


Рис. 13. Макрошліфи поперечних сечень наплавочних швів при ТІГ сварці постійним током 150 А, виконаних без присадки (а) і з присадочною проволокою (в), а також при ВЧІ модуляції сварочного тока на частоті 16 кГц (пікове значення тока 500 А, середнє значення – 150 А) без використання (б) і з використанням (г) присадочної проволоки [7]

указана довжина дуги, при якій були отримані форми проплавлення, показані на рис. 13.

В роботі [8] індійських учених було досліджено вплив низькочастотної ($f = 6$ Гц) модуляції тока дуги при ТІГ сварці алюмінієвого сплаву на розподіл температури в зварюваному металі і форму його проплавлення, прочнісні властивості і мікроструктурні особливості металу шва і зони термічного впливу, розподілу твердості і залишкових напружень в зварених зразках. Во всіх експериментах використовувалася дуга з тугоплавким катодом (W+2%Th) діаметром 3,2 мм, довжина дуги підтримувалася постійною, рівною 2 мм, в якості захисного газу використовувався хімічно чистий аргон (99,99 %). Виконувалися наплавочні шви на зразках товщиною 4 мм із алюмінієвого сплаву AA6351-T6, склад і механічні властивості якого приведені в табл. 3, 4. Вимірювання температури здійснювалися трь-

ма термопарами, розташованими на відстанях 5, 15 і 30 мм від середньої лінії шва.

Параметри режимів в експериментах по сварці постійним током і з низькочастотною імпульсною модуляцією тока дуги приведені в табл. 5 і 6, відповідно. Швидкість s сварки модульованим током вибиралася такою ж, як і при сварці на постійному тоці (4,167 мм/с), ККД процесу η передбачалося постійним, рівним 70 % і не залежати від режиму сварки. Відповідна погонна енергія вивчалася по формулі $Q = (\eta IV)/s$, де I, V – сварочний ток і напруга на дугі. В випадку модульованого тока його значення, входять в приведену формулу, визначалися як середнє $I_m = (I_p t_p + I_b t_b)/t_T$, де I_p, I_b – значення тока в імпульсі і в паузі; t_p, t_b – тривалості імпульсу і паузи; t_T – тривалість періоду модуляції, коефіцієнт заповнення вивчалася як $\delta = t_p/t_T$.

Форми і геометричні розміри поперечних сечень наплавочних швів, отриманих в експериментах по сварці неплавящимся електродом на постійному тоці (ПТ) і при сварці модульованим током (МТ), представлені в табл. 7. Тут слід відзначити, що в результаті експеримента

Таблиця 3. Хімічний склад зварюваного металу (мас. %) [8]

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Zr	Al
0,7	1,2	0,5	0,1	0,6	0,2	0,05	бал.

Таблиця 4. Механічні властивості основного металу [8]

Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение на 50 мм длины, %	Микротвердость HV при 0,49 Н
150	250	20	95

Таблиця 5. Параметри режимів сварки постійним током [8]

Номер експеримента	Сварочний ток, А	Напруга на дугі, В	Швидкість сварки, мм/с	ККД процесу, %	Погонна енергія, Дж/мм
1	110	12,5	4,167	70	231
2	120	12,7	4,167	70	256
3	130	12,2	4,167	70	266
4	140	12,5	4,167	70	294
5	150	12,4	4,167	70	312

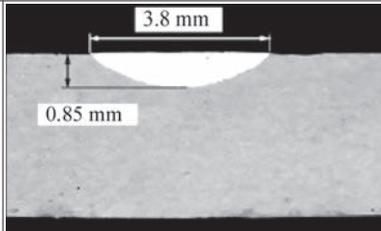
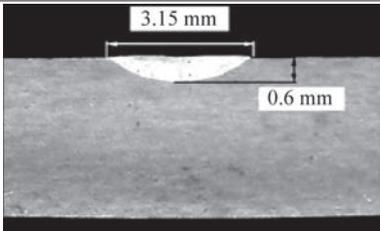
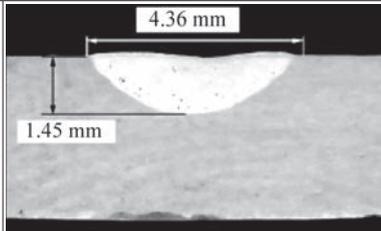
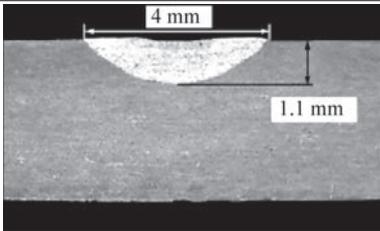
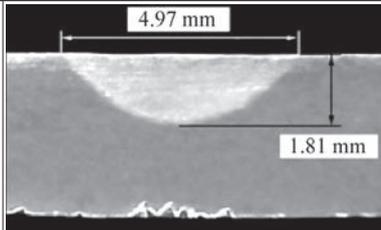
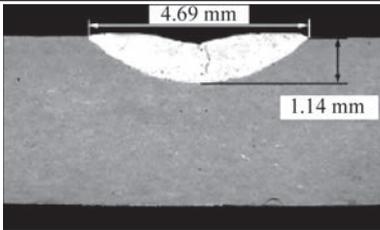
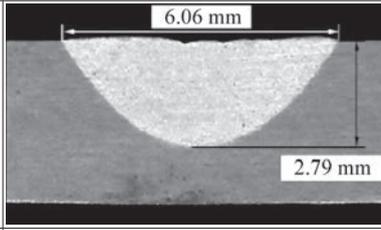
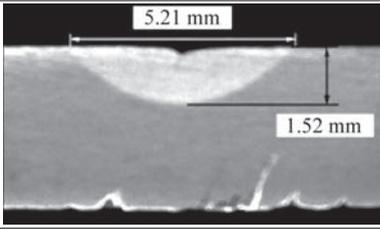
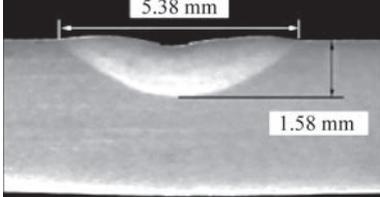
Таблиця 6. Параметри режимов сварки с импульсной модуляцией тока дуги ($f=6$ Гц) [8]

Номер эксперимента	Ток в импульсе, А	Ток в паузе, А	Напряжение на дуге, В	Коэффициент заполнения, %	Погонная энергия, Дж/мм
1	110	55	11	50	161
2	120	60	12	50	191
3	130	65	13	50	224
4	140	70	12,5	50	232
5	150	75	13,5	50	269

№ 5 по сварке постоянным током (погонная энергия 312 Дж/мм) происходило образование трещин, поэтому соответствующие данные в работе [8] не приводятся.

Максимальные значения температуры и значения скорости охлаждения в диапазоне 400...200 °С

Таблиця 7. Формы поперечных сечений и геометрические характеристики швов, выполненных TIG сваркой на постоянном токе и с низкочастотной импульсной модуляцией тока [8]

Ток, А	Поперечное сечение швов		D/T*		W/D	
	ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ
110			0,22	0,15	5,50	5,25
120			0,36	0,28	3,00	3,64
130			0,45	0,29	2,75	4,11
140			0,70	0,38	2,17	3,43
150	–		–	0,40	–	3,41

Примечание *Т – толщина образца.

в точках, находящихся на расстоянии 5 и 15 мм от средней линии шва, представлены в табл. 8.

Для сравнения прочностных свойств, микротвердости, микроструктуры и остаточных напряжений использовались только два образца, на одном из которых наплавочный шов был выполнен дугой постоянного тока 120 А (эксперимент № 2), а на другом – с модуляцией сварочного тока при токе в импульсе 140 А (эксперимент № 4). Глубина проплавления на обоих образцах была примерно одинаковой 1,45 и 1,52 мм (см. табл. 7), что позволило сравнить прочностные характеристики наплавочных швов путем удаления непроплавленного металла до толщины образцов 1,5 мм. Результаты соответствующих механических испытаний приведены в табл. 9.

Таблиця 8. Максимальные значения температуры и скорость охлаждения при TIG сварке на постоянном токе, а также с импульсной модуляцией тока дуги [8]

Номер эксперимента	Ток, А	Погонная энергия, Дж/мм		Максимальная температура (5 мм), К		Скорость охлаждения, °C/с		Максимальная температура (15 мм), К	
		ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ
1	110	231	161	586	589	16,1	19,2	475	460
2	120	256	191	648	609	14,4	13,5	210	447
3	130	266	224	666	626	12,7	13,0	519	484
4	140	294	232	710	704	11,8	12,9	544	505
5	150	312	268	-	707	-	11,9	-	516

Таблиця 9. Прочностные характеристики швов, выполненных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение, %	Прочность относительно основного металла, %
ПТ	185	200	8	80
МТ	205	225	10	90

Распределение микротвердости исследуемых образцов приведено в табл. 10, распределение остаточных напряжений – в табл. 11.

Как следует из экспериментальных данных, приведенных в табл. 9–11, использование НЧИ модуляции тока ($f = 6$ Гц) приводит к улучшению прочностных характеристик, повышению микротвердости и снижению уровня остаточных напряжений в образцах по сравнению со сваренными на постоянном токе. Причиной этого является установленное в [8] измельчение структуры металла шва и зоны термического влияния при модуляции сварочного тока.

В работе [9] приведены экспериментальные данные по глубине и форме проплавления при TIG сварке нержавеющей стали 0Cr18Ni9Ti толщиной 6 мм в аргоне (скорость сварки 120 мм/мин) с высокочастотной ($f =$

$= 20 \dots 80$ кГц) модуляцией тока прямоугольными импульсами в форме меандра (ток в импульсе 130 А, ток в паузе 50 А). Для сравнения приводятся соответствующие данные для сварки на постоянном токе, значение которого равно эффективному значению модулированного тока ($I = I_{eff} \approx 100$ А). Макрошлифы соответствующих наплавочных швов показаны в табл. 12, а на рис. 14 изображены зависимости глубины проплавления H и ширины шва B от частоты модуляции. Как следует из приведенных данных, глубина проплавления немонотонно возрастает с увеличением частоты, а ширина шва практически линейно уменьшается.

Авторами работы [9] проведено также численное моделирование геометрических параметров наплавочных швов, полученных в экспериментах. При проведении расчетов учитывался прогиб по-

Таблиця 10. Распределение микротвердости в образцах, сваренных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Микротвердость HV			
	Центр шва	5 мм от центра шва	15 мм от центра шва	Основной металл
ПТ	72	84	92	95
МТ	81	88	93	95

Таблиця 11. Распределение остаточных напряжений в образцах, сваренных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Остаточные напряжения, МПа			
	Центр шва	5 мм от центра шва	15 мм от центра шва	Основной металл
ПТ	134	92	-60,5	-38,4
МТ	112	74	-55,6	-36,3

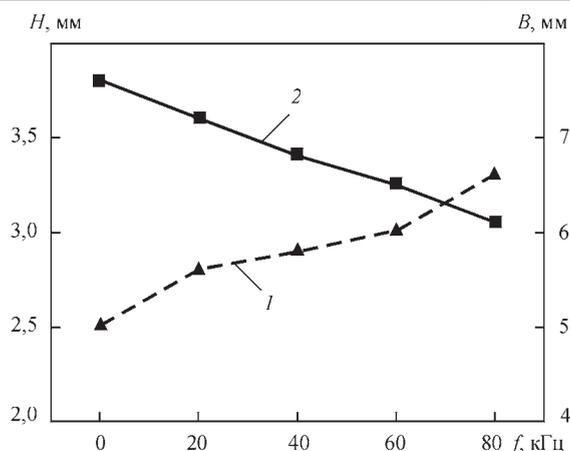


Рис. 14. Зависимости глубины проплавления (1) и ширины шва (2) от частоты модуляции тока дуги [9]

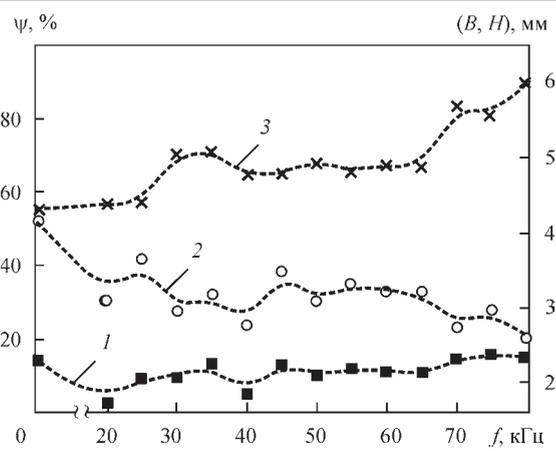
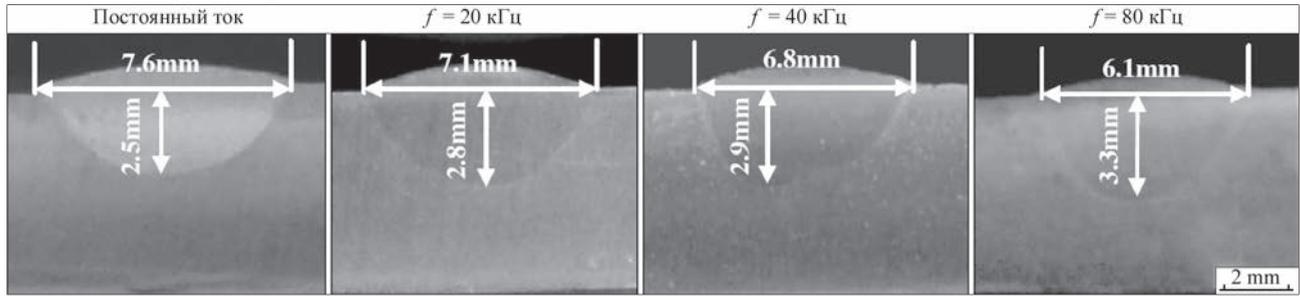


Рис. 15. Зависимости глубины проплавления H , мм (1), ширины шва B , мм (2) и коэффициента формы шва ψ , % (3) от частоты модуляции сварочного тока [10]

Таблиця 12. Форми поперечних сечень наплавочних швов, виконаних на постійному тоці і с ВЧИ модуляцією тоці [9]



верхности сварочной ванны, вызванный возрастающими с частотой значениями давления дуги на эту поверхность. Результаты моделирования вместе с соответствующими экспериментальными данными сведены в табл. 13. Сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об их удивительном совпадении (с точностью порядка 1 %).

Работа [10] китайских ученых посвящена экспериментальному исследованию влияния частоты импульсной модуляции тока дуги на проплавление металла при TIG сварке. В экспериментах использовалась дуга длиной 3 мм с тугоплавким (W+2%Ce) катодом диаметром 2,4 мм, защитный газ Ar (99,99 %), скорость сварки 150 мм/мин. Сваривались образцы из титанового сплава TC4, состав которого приведен в табл. 14, толщиной 2,5 мм. Параметры модуляции тока были следующими: прямоугольные импульсы в виде меандра, следующие с частотой в диапазоне 20...80 кГц, при базовом значении тока

$I_b = 40 \text{ A}$, пиковом значении $I_p = 100 \text{ A}$ (среднее значение тока 70 А). Для сравнения были проведены эксперименты по сварке на постоянном токе $I = 80 \text{ A}$.

Зависимости глубины проплавления H , ширины шва с лицевой стороны образца B и коэффициента формы шва $\psi = H/B$ от частоты f модуляции приведены на рис. 15. Как следует из представленных на этом рисунке экспериментальных данных, ширина шва с ростом частоты модуляции заметно снижается при некотором увеличении глубины проплавления. Эту тенденцию авторы [10] объясняют уменьшением радиуса области анодной привязки («корня») r дуги с увеличением частоты модуляции, что иллюстрируют экспериментальные данные, приведенные на рис. 16.

В работе [11] экспериментально исследовалось влияние токовых параметров НЧИ модуляции при TIG сварке стали SAE 1020 толщиной 6,5 мм в ат-

Таблиця 13. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по глубине проплавления и ширине шва [9]

Частота модуляции, кГц	Глубина проплавления, мм		Ширина шва, мм	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
0	2,47	2,45	7,61	7,6
20	2,81	2,78	7,13	7,14
40	2,90	2,91	6,80	6,84
60	3,0	3,0	6,5	6,6
80	3,33	3,32	6,11	6,16

Таблиця 14. Химический состав свариваемого материала (мас. %) [10]

Al	V	N	C	H	O	Fe	Ti
5,82	3,99	0,023	1,83	0,0007	0,063	<0,05	бал.

Таблиця 15. Токовые параметры модуляции, используемые при проведении экспериментов [11]

Номер эксп.	Базовое значение тока, А	Пиковое значение тока, А	Амплитуда модуляции, А	Среднее значение тока, А		Эффективное значение тока, А	
				Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	150	150	0	150	150	150	150
2	95	205	110	150	151	160	160
3	70	230	160	150	151	170	169
4	50	250	200	150	150	180	179
5	35	265	230	150	151	189	188
6	20	280	260	150	146	198	192
7	10	290	280	150	146	205	198
8	128	168	40	148	148	150	150
9	78	198	120	138	139	150	151
10	10	212	200	111	114	150	150

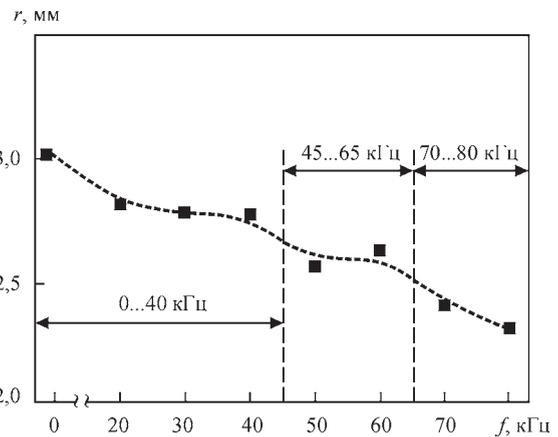


Рис. 16. Зависимость радиуса корня дуги r от частоты модуляции тока f [10]

мосфере аргона. Использовался тугоплавкий катод EWTh2 диаметром 2,4 мм с углом заточки рабочего конца 60°. Длина дуги во всех экспериментах была 2 мм, скорость сварки 10 см/мин. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами в виде меандра, следующими с частотой 50 Гц, токовые параметры модуляции приведены в табл. 15.

На рис. 17 представлены экспериментальные данные по глубине проплавления, ширине шва и площади его поперечного сечения для первых семи экспериментов, при проведении которых

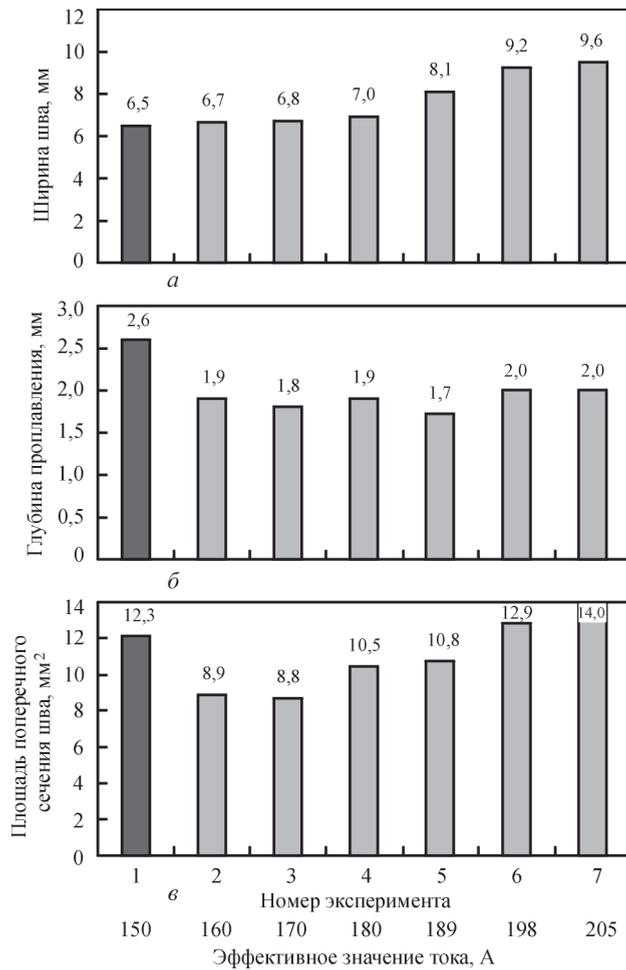


Рис. 17. Зависимости ширины шва (а), глубины проплавления (б) и площади поперечного сечения шва (в) от эффективного значения тока при постоянном $I_m = 150$ А [11]

Таблица 16. Параметры модуляции тока, используемые при проведении экспериментов [12]

Режим	Устанавливаемые параметры			Измеряемые параметры			
	I_m, A	I_p, A	I_b, A	I_m, A	I_{rms}, A	U_m, B	U_{rms}, B
ΔI 300	200	350	50	199	249	12,5	12,8
ΔI 200	200	300	100	202	225	12,9	13,0
ΔI 100	200	250	150	200	206	12,7	12,9
ΔI 50	200	225	175	200	201	12,8	13,0
ΔI 20	200	210	190	200	200	12,6	12,8
ΔI 10	200	205	195	198	200	12,5	12,7
ΔI 0	200	–	–	199	200	12,8	12,8
ΔI 0	206	–	–	206	206	12,9	12,9
ΔI 0	224	–	–	225	225	12,6	12,6
ΔI 0	249	–	–	251	251	12,9	12,9

поддерживалось постоянное среднее значение тока дуги $I_m = 150$ А.

Как следует из приведенных на этом рисунке диаграмм, ширина шва растет с увеличением амплитуды модуляции, а, следовательно, и эффективного значения тока I_{rms} (см. табл. 15), а глубина проплавления практически не изменяется, оставаясь ниже соответствующего значения для сварки на постоянном токе. Площадь поперечного сечения швов также возрастает с ростом эффективного значения тока и начинает превышать глубину проплавления в случае сварки на постоянном токе при $I_{rms} > 198$ А.

На рис. 18 приведены аналогичные данные для экспериментов 1, 8–10, выполненных при условии постоянства I_{rms} и соответствующем снижении I_m .

Приведенные на рис. 18 экспериментальные данные свидетельствуют о заметном снижении (относительно соответствующих характеристик для сварки на постоянном токе) глубины проплавления и площади поперечного сечения шва при уменьшении среднего значения тока дуги, тогда как ширина шва существенно не изменяется. Это позволило авторам [11] сделать вывод о том, что глубина проплавления при TIG сварке с низкочастотной модуляцией тока зависит в основном от среднего значения модулированного тока, тогда, как ширина шва – от его эффективного значения.

Работа [12] также посвящена анализу влияния таких характеристик модуляции сварочного тока, как его среднее I_m и эффективное (действующее) I_{rms} значения на глубину проплавления, ширину и площадь поперечного сечения шва, а также на погонную энергию при TIG сварке углеродистой стали толщиной 6,3 мм в атмосфере аргона. В экспериментах использовался тугоплавкий катод (W+2%Th) диаметром 4 мм с углом заточки рабочего конца 60°, длина дуги была постоянной, равной 3,5 мм, скорость сварки – 12 см/мин. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами в форме меандра ($t_p = t_b = 0,25$ с, частота 2 Гц), токовые параметры модуляции приведены в табл. 16.

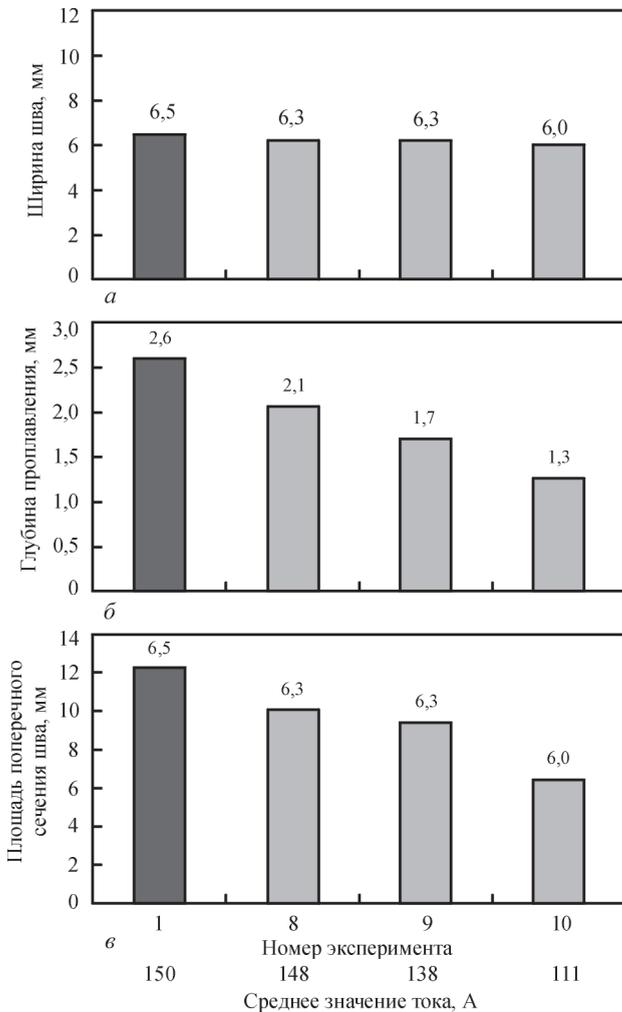


Рис. 18. Зависимости ширины шва (а), глубины проплавления (б) и площади поперечного сечения шва (в) от среднего значения тока при постоянном $I_{rms} = 150$ А [11]

Приведенные на рис. 19 экспериментальные данные подтверждают вывод работы [11] о том, что геометрические характеристики швов при TIG сварке углеродистой стали с НЧИ модуляцией тока определяются как средним, так и эффективным значением модулированного тока.

Анализ результатов экспериментальных работ по исследованию процессов проплавления металла, геометрических параметров, качества и механических характеристик швов при TIG сварке с модуляцией сварочного тока позволяет сделать следующие выводы:

1. При TIG сварке алюминиевых сплавов использование низкочастотной импульсной модуляции тока дуги с частотой 6 Гц приводит к заметному улучшению прочностных характеристик (на 10...13 %) и повышению микротвердости (до 12 %) металла шва, а также к снижению уровня остаточных напряжений (до 20 %) по сравнению с образцами, сваренными на постоянном токе. Причиной этого является измельчение структуры металла шва и зоны термического влияния при НЧИ модуляции сварочного тока. При-

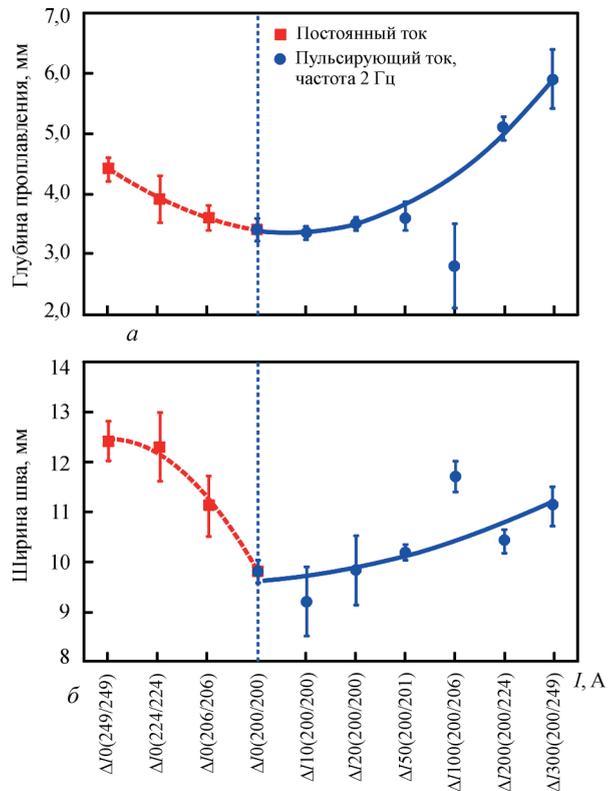


Рис. 19. Влияние среднего I_m и эффективного I_{rms} значений тока на глубину проплавления (а) и ширину шва (б), где ΔI – амплитуда модуляции; в скобках – I_m / I_{rms} [12]

менение ВЧИ модуляции тока с частотой до 25 кГц существенно снижает количество пор и неметаллических включений на единицу длины шва (до 80 %). Кроме того, такая модуляция может эффективно использоваться для разрушения неоднородной литой структуры металла, наблюдающейся в швах, выполненных на постоянном токе. В результате микроструктура металла шва при TIG сварке алюминиевых сплавов с ВЧИ модуляцией тока дуги является более однородной, поэтому такие швы имеют значения вязкости разрушения на 10...15 % выше, чем при сварке постоянным током.

2. В случае TIG сварки нержавеющей стали с низкочастотной модуляцией тока прямоугольными импульсами, следующими с частотой 1...5 Гц, глубина проплавления и ее отношение к ширине шва оказываются больше, чем в случае сварки на постоянном токе с тем же значением погонной энергии. При среднечастотной синусоидальной модуляции тока в диапазоне до 4 кГц и высокочастотной модуляции тока прямоугольными импульсами на частотах в диапазоне 10...80 кГц глубина проплавления нержавеющей стали также превосходит соответствующую величину при TIG сварке постоянным током, равным среднему значению модулированного тока. Что касается ширины шва, то она оказывается несколько больше соответствующей величины для швов, выполненных TIG сваркой на постоянном токе.

3. С ростом частоты импульсной модуляции сварочного тока в случае ТIG сварки никель-хромовых жаропрочных сплавов размер зоны проплавления металла уменьшается, тогда как размер зоны термического влияния – увеличивается. Это свидетельствует о снижении эффективности плавления свариваемого металла (термического КПД) при увеличении частоты модуляции тока дуги. Что касается микроструктуры металла шва, то использование ВЧИ модуляции тока не приводит к заметному ее улучшению по сравнению с ТIG сваркой на постоянном токе.

4. При ТIG сварке углеродистой стали с низкочастотной модуляцией тока прямоугольными импульсами глубина проплавления металла зависит в основном от среднего значения модулированного тока, тогда как ширина шва – от его эффективного значения.

Список литературы / References

1. Бои У., Кривцун И.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор) Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **11**, 29–39.
2. Roden, W.A. (1972) High-frequency, pulsed-current GTA welding. In: *Proc. of National Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting* (2–5 Oct. 1972, San Diego, California, USA). Paper 720874, pp. 1–8.
3. Leitner, R.E., McElhinney, G.H., Pruitt, E.L. (1973) An investigation of pulsed GTA welding variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **9**, 405–410.
4. Omar, A.A., Lundin, C.D. (1979) Pulsed plasma – pulsed GTA arcs: A study of the process variables. *Ibid.*, **4**, 97–105.
5. Saedi, H.R., Unkel, W. (1988) Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW. *Ibid.*, **11**, 247–255.
6. Dzelnitzki, D. (2000) Muendersbach TIG – direct-current welding with high-frequency pulses, an interesting process variant. *EWM Hightec Welding GmbH*. WM008801. DOC; 08.00.
7. Onuki, J., Anazawa, Y., Nihei, M. et al. (2002) Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation. *Japan. J. Appl. Phys.*, **41**, 5821–5826.
8. Karunakaran, N., Balasubramanian, V. (2011) Effect of pulsed current on temperature distribution weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 278–286.
9. Qi, B., Yang, M., Cong, B. et al. (2013) The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **66**, 1545–1553.
10. Yang, Z., Qi, B., Cong, B. et al. (2013) Effect of pulse frequency on weld appearance behavior by TC4 titanium alloys. *Trans. China Welding Institute*, **34**(12), 37–40.
11. Cunha, T.V.d., Louise-Voigt, A., Bohorquez, C.E.N. (2016) Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process. *J. of Materials Processing Technology*, **231**, 449–455.
12. Silva, D.C.C., Scotti, A. (2016) Using either mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries. *Ibid.*, **240**, 382–387.

ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд).

Частина II. Ефекти дугового впливу на зварювальний метал

У. Бої¹, І.В. Кривцун²

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).

510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом в інертному газі з модуляцією зварювального струму. Друга частина огляду присвячена аналізу робіт, в яких розглядаються особливості проплавлення металу (алюмінієві сплави, нержавіючі сталі, нікель-хромові жаростійкі сплави) та формування швів при ТIG зварюванні модульованим струмом. Бібліогр. 12, табл. 16, рис. 19.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, ТIG зварювання, зварювальний метал, проплавлення, зварювальний шов, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда

PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review).

Part II. Effects of arc impact on the metal being welded

U.Boi¹, I.V.Krivtsun²

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding).

363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

A review of studies, devoted to the processes of nonconsumable electrode inert-gas welding with welding current modulation was performed. The second part of the review is devoted to analysis of the works, dealing with the features of metal penetration (aluminium alloys, stainless steel, high-temperature nickel-chromium alloys) and weld formation in TIG welding with modulated current. 12 Ref., 16 Tabl., 19 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, TIG welding, welded metal, penetration, weld, welding current modulation, pulse, frequency, fill factor, amplitude

Поступила в редакцію

04.11.2019