

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА ДЕФОРМАЦИЮ ТОНКИХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

А.А. Бабинец

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

В статье приведена сравнительная экспериментальная оценка влияния различных факторов на остаточные деформации при дуговой наплавке тонких стальных пластин. Оценивали влияние химического состава, структурного состояния и способа закрепления детали при наплавке проволоками Св-08А, ПП-Нп-25Х5ФМС и Св-Х19Н18Г6МЗВ2 на пластины из стали Ст3 размерами 3×150×240 мм при различных условиях их закрепления. Экспериментально установлено, что наибольшее влияние на уровень остаточных деформаций оказывает различие в физических свойствах и структурном состоянии основного и наплавленного металлов. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при разработке технологии износостойкой наплавки тонколистовых конструкций. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: дуговая наплавка, тонкая пластина, остаточные деформации, структурные изменения, коэффициент теплового расширения, способ закрепления, износостойкий слой

Известно, что при наплавке тонколистовых конструкций наблюдаются остаточные напряжения и деформации, причинами которых являются неравномерный нагрев металла в зоне наплавки, литейная усадка наплавленного металла, разница в коэффициенте температурного расширения (КТР) наплавленного и основного металлов, структурные превращения в наплавленном металле в процессе охлаждения, а также способ закрепления детали [1–3].

В зависимости от вида и уровня остаточных деформаций после наплавки, эксплуатационные характеристики изготовленных деталей могут существенно ухудшиться [1–3]. В наибольшей степени это относится к тонким пластинам или листам с большими площадями наплавленных поверхностей. Поэтому проблема оценки влияния различных факторов на остаточные наплавочные деформации является одной из наиболее актуальных для наплавочного (сварочного) производства.

Целью данной работы являются сравнительные экспериментальные исследования влияния химического состава, структуры наплавленного металла, а также способа закрепления наплавляемой детали на уровень остаточных деформаций при наплавке тонких стальных пластин.

Известно, что по мере роста температуры в зоне наплавки предел прочности, упругость и теплопроводность стали снижаются, а тепловое расширение и удельная теплоемкость возрастают. Такое изменение физико-механических свойств металла влияет на теплоотдачу и однородность распределения тепла в детали. Чем выше температура нагрева, тем больше КТР, ниже теплопроводность стали, и тем выше уровень напряжений и

деформаций в изделии [1, 2]. Если же КТР основного и наплавленного металла будут значительно отличаться между собой, это может оказать дополнительное негативное влияние на уровень остаточных напряжений и деформаций.

К образованию напряжений и деформаций приводят также фазовые превращения при охлаждении наплавленного металла, которые сопровождаются изменением его объема [1–3]. У низкоуглеродистых сталей это вызывает изменение примерно 1 % объема, однако у сталей, содержащих более 0,35 % углерода, и большинства склонных к закалке легированных сталей наблюдаются значительные объемные изменения вследствие мартенситного превращения.

Определенное влияние на уровень остаточных деформаций оказывает также способ закрепления детали. В общем случае, при жестком закреплении наплавленной детали до момента ее полного остывания до комнатной температуры, в наплавленном металле будут наблюдаться напряжения, которые при раскреплении зажимов приведут к деформации детали [1–3]. Применяя оснастку с теплоотводящими поверхностями, например, медными подкладками, можно несколько снизить уровень остаточных деформаций. Эффективность теплоотвода при использовании таких подкладок зависит от их размеров, разности температур подкладки и наплавляемой детали, термического соприкосновения в зоне контакта подкладки и детали [4, 5].

Материалы и методики исследования. В данной работе для сравнительной экспериментальной оценки влияния физико-механических свойств наплавочных материалов, их структур-

ного класса, а также способа закрепления детали на уровень остаточных деформаций при наплавке тонких пластин достаточно большой площади, использовались следующие материалы и оснастка.

Наплавка выполнялась на пластины из стали Ст3 толщиной 3 мм размерами 240×150 мм тремя проволоками: низкоуглеродистой сплошной проволокой Св-08А, диаметром 1,2 мм, обеспечивающей получение ферритно-перлитного наплавленного металла, близкого по химическому составу и свойствам к основному металлу; среднелегированной порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС, диаметром 1,4 мм, обеспечивающей получение мартенситно-бейнитного наплавленного металла с небольшим количеством остаточного аустенита; и высоколегированной сплошной проволокой Св-Х19Н18Г6МЗВ2, диаметром 1,2 мм, обеспечивающей получение наплавленного металла с аустенитной структурой. Химический состав и свойства материалов приведены в табл. 1 и 2 [6, 7].

Выбор именно таких наплавочных материалов объясняется разностью в их физико-механических свойствах и структурном состоянии по сравнению с основным металлом и, соответственно, предполагаемым их различным влиянием на уровень остаточных деформаций наплавливаемых пластин.

Так, при наплавке проволокой Св-08А уровень деформаций пластин из стали Ст3 будет зависеть только от влияния местного нагрева, так как разницы в КТР и структурном состоянии практически нет. Для проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС — от влияния местного нагрева и мартенситного превращения, которое сопровождается увеличением объема наплавленного металла, так как разница в КТР в данном случае минимальна. При наплав-

ке проволокой Св-Х19Н18Г6МЗВ2 — от влияния местного нагрева и значительной разницы КТР основного и наплавленного металла.

Размеры зоны наплавки составляли 200×100 мм. Наплавка всеми проволоками выполнялась односторонними валиками с перекрытием соседних валиков на 40...50 %, на одинаковом режиме: ток 150...160 А; напряжение 22...23 В; скорость наплавки 30 м/ч. Такой режим наплавки обеспечивал получение наплавленного слоя толщиной примерно 2,5 мм. Наплавка пластин осуществлялась в один и два слоя для каждого типа проволоки.

Режимы наплавки выбирались исходя из имеющихся в технической литературе рекомендаций о возможности получения качественных наплавленных (сварных) тонколистовых соединений, в которых отсутствуют прожоги, поры, и другие дефекты, а также положительных результатов собственных предварительных экспериментов [8, 9].

Пластины для наплавки закреплялись на сварочном столе с медной поверхностью и прижимались к нему с помощью двух металлических планок, расположенных по длинным сторонам пластин. Одна из планок прижимала край пластины к столу, полностью препятствуя его перемещению (жесткое закрепление), а другая — не давала краю пластины деформироваться в вертикальном направлении, но давала возможность ей смещаться в горизонтальной плоскости (подвижное закрепление) (рис. 1). Выбор такой схемы закрепления был сделан на основе положительных результатов, полученных в предварительных экспериментах по наплавке тонких листов [9].

Также, для оценки степени влияния теплового контакта между наплавливаемой деталью и сварочным столом на остаточные наплавочные дефор-

Таблица 1. Химический состав основного и наплавленного металлов [6, 7]

Марка стали или проволоки	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	W
Ст3	0,14...0,22	≤0,05	0,3...0,6	≤0,3	≤0,3	-	-	-
Св-08А (08кп)	0,05...0,12	≤0,03	0,25...0,45	≤0,1	≤0,3	-	-	-
ПП-Нп-25Х5ФМС	0,2...0,3	0,8...1,3	0,5...1,0	4,6...5,8	-	0,2...0,6	0,9...1,5	-
4Х5ФМС*	0,3...0,4	0,9...1,2	0,2...0,5	4,5...5,5	-	0,3...0,5	1,2...1,5	-
Св-Х19Н18Г6МЗВ2	0,1...0,2	0,3...0,6	4,0...0	17,0...19,0	16,0...18,0	-	2,4...3,3	1,8...2,5
20Х23Н18*	≤0,2	≤0,1	≤2,0	22,0...25,0	17,0...20,0	-	-	-

Примечание. В литературе отсутствуют данные по КТР для используемых материалов: Св-08А, ПП-Нп-25Х5ФМС и Св-Х19Н18Г6МЗВ2. Поэтому приведены данные для наиболее близких к ним по структурному классу и химическому составу сталей.

Таблица 2. Коэффициент теплового расширения основного и наплавленного металлов в диапазоне температур 20...900 °С [6]

Марка стали	Коэффициент теплового расширения α , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$								
	20...100	20...200	20...300	20...400	20...500	20...600	20...700	20...800	20...900
08кп*	12,5	13,4	14,0	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	14,7
4Х5ФМС*	12,6	13,1	13,7	14,0	14,3	14,6	14,7	14,6	14,1
20Х23Н18*	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	-	-

* В литературе отсутствуют данные по КТР для используемых материалов: Св-08А, ПП-Нп-25Х5ФМС и Св-Х19Н18Г6МЗВ2. Поэтому приведены данные для наиболее близких к ним по структурному классу и химическому составу сталей.



Рис. 1. Внешний вид наплавляемой пластины (1), закрепленной на сварочном столе (2) при помощи прижимных планок (3) с указанием схемы наложения валиков

мации, выполнялась наплавка пластин с аналогичным закреплением, но на весу. Для этого под зажимаемые края пластины размещали узкие стальные планки так, чтобы наплавка осуществлялась с зазором в 10 мм от поверхности сварочного стола.

Наплавку каждой пластины начинали со стороны жесткого закрепления и вели к другому краю без перерывов на охлаждение, согласно схеме, изображенной на рис. 1. После наплавки слоя прижимные планки не снимали до полного остывания пластины, после чего проводили визуальный осмотр.

Измерение деформаций проводилось при помощи жесткой линейки, устанавливаемой с тыльной стороны наплавленной пластины, и индикаторной головки, перемещаемой по линейке, с регистрацией отдельных точек по схеме, изображенной на рис. 2. Так как было запланировано большое количество экспериментов, для облегчения последующего анализа полные профилограммы снимались только в перпендикулярном направлении к наплавленным швам по центру

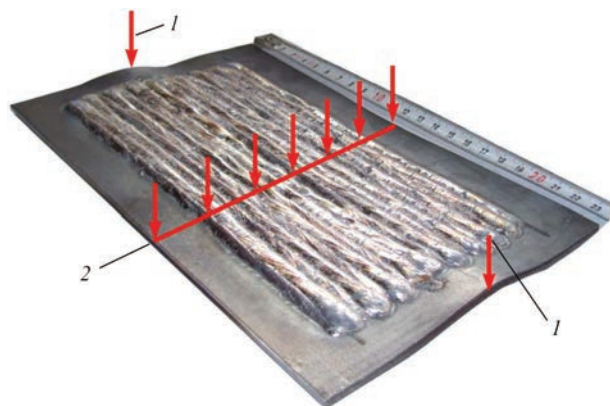


Рис. 2. Схема замеров величины деформации пластин после наплавки: 1 — замеры максимальной величины деформации на свободных краях пластин; 2 — замеры величины деформаций в поперечном направлении по центру пластины, на различном расстоянии l от ее края

пластины, а в качестве дополнительных параметров фиксировали также величину максимальной деформации по свободным краям пластин.

Обсуждение полученных результатов. Было установлено, что при наплавке в один и два слоя полностью прижатых к поверхности сварочного стола пластин, в наплавленном металле отсутствуют дефекты типа прожогов, пор, трещин и т.п. Вследствие наплавки все пластины получили деформацию в виде выгиба вверх, однако величина этих деформаций в каждом случае была разной.

Для данного типа закрепления наибольшие деформации были зафиксированы для пластин, наплавленных аустенитной проволокой Св-Х-19Н18Г6М3В2, максимальные значения деформации для пластин, наплавленных в два слоя, составили 2,7 мм в центре пластины и 6,7 мм на их свободных краях. Промежуточное значение величины деформации имели пластины, наплавленные проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС — их максимальная деформация составила 2,4 и 6,5 мм, соответственно. Наименьшая же величина деформаций была отмечена у пластин, наплавленных проволокой Св-08А — 0,8 мм в центре пластины и 4,5 мм на свободных краях.

Такое различие в остаточных деформациях пластин при наплавке разными по химическому составу и структурному классу проволоками, очевидно, объясняется появлением остаточных напряжений, вызванных большой разницей между величинами КТР основного и наплавленного металлов в случае наплавки проволокой Св-Х-19Н18Г6М3В2, а также мартенситным превращением с увеличением объема, в случае наплавки проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС.

В случае закрепления пластин на весу с зазором 10 мм к поверхности сварочного стола, получить наплавленный слой без прожогов удалось лишь при повышении скорости наплавки с 30 до 40 м/ч. Остальные режимы наплавки остались неизменными. В этом случае также было отмечено, что наибольшие деформации характерны для пластин, наплавленных аустенитной проволокой Св-Х-19Н18Г6М3В2, однако величина и характер деформации пластин, наплавленных на весу, отличались от деформации пластин, наплавленных без зазора.

Несмотря на то, что при наплавке с зазором, максимальная деформация пластин на свободных краях была несколько ниже, чем без него: 5,8 мм для пластины, наплавленной проволокой Св-Х-19Н18Г6М3В2; 5,5 мм — при наплавке проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС и 3,6 мм — в случае наплавки проволокой Св-08А, величина деформации по центру пластины была значительно выше, чем при наплавке без зазора (рис. 3).

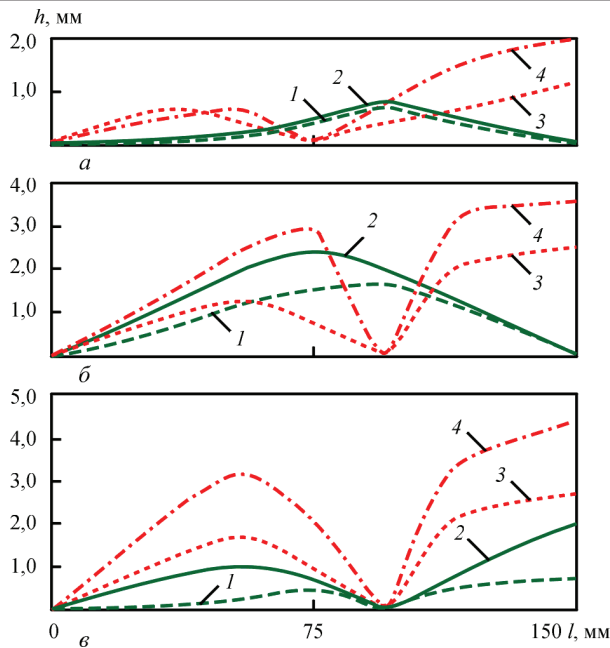


Рис. 3. Величина деформации по центру пластин, закрепленных без зазора и с зазором, и наплавленных в один и два слоя проволоками: Св-08А (а), Пп-Нп-25Х5ФМС (б) и Св-Х-19Н18Г6МЗВ2 (в): 1 — наплавка без зазора, 1-й слой; 2 — наплавка без зазора, 2-й слой; 3 — наплавка с зазором, 1-й слой; 4 — наплавка с зазором, 2-й слой



Рис. 4. Внешний вид деформированного поперечного края пластины после наплавки двух слоев проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС при закреплении без зазора (а) и с зазором (б)

Также следует отметить, что в результате ухудшения условий теплоотдачи наплавливаемых заготовок, а также жесткости их закрепления, пластины, наплавленные с зазором, получили неблагоприятный, с точки зрения последующей возможной правки, поперечный профиль (рис. 4).

Таким образом, экспериментально было установлено, что на остаточные деформации при электродуговой наплавке пластин в наибольшей степени оказывает влияние различие физико-механических свойств и структурного состояния основного и наплавленного металла, а также способ закрепления пластин на сварочном столе.

Применение электродных материалов с КТР, близким к основному металлу, но у которых при охлаждении наплавленного металла происходят значительные структурные превращения, по уровню влияния на остаточные деформации сопоста-

вимо с наплавкой материалами без таких превращений, но с большой разницей в КТР основного и наплавленного металлов.

В последующих работах планируется более подробное описание установленных закономерностей с проведением сравнительных исследований напряженного и структурного состояния наплавленных пластин.

Выводы

1. При дуговой наплавке тонких стальных пластин на уровень их деформации влияют следующие основные факторы:

- различие в КТР основного и наплавленного металла;
- структурные превращения, протекающие в наплавленном металле при охлаждении;
- способ закрепления пластины на сварочном столе.

2. Из приведенных выше факторов на величину остаточных деформаций наибольшее влияние оказывает химический состав и структура наплавленного металла, что проявляется в различиях КТР и структурных превращений во время охлаждения основного и наплавленного металлов.

3. Использование прижимных приспособлений с теплоотводящими поверхностями при наплавке тонких пластин может обеспечить уменьшение остаточных деформаций при соблюдении хорошего теплового контакта между наплавливаемой пластиной и теплоотводящей поверхностью.

Список литературы

1. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. (1984) *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение.
2. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. (1987) *Напряжения и деформации при сварке*. Киев, Вища школа.
3. Макаров Э.Л. (1991) *Сварка и свариваемые материалы*: в 3-х т. Т. 1. *Свариваемость материалов*. Москва, Металлургия.
4. Лобанов Л.М., Павловский В.И., Логинов В.П., Пашин Н.А. (1990) Регулирование термодформационных циклов при сварке листовых конструкций с применением теплопоглотителей. *Автоматическая сварка*, **9**, 39–46.
5. Гедрович А.И., Жидков А.Б. (2000) Применение теплоотводящих устройств для снижения сварочных деформаций и напряжений. *Там же*, **2**, 45–49.
6. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. (2003) *Марочник сталей и сплавов*. 2-е изд. Москва, Машиностроение.
7. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, ЕкоТехноЛогія.
8. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П. (2003) *Восстановление деталей машин. Справочник*. Иванов В.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
9. Бабинцев А.А., Рябцев И.А. (2017) Порошковая проволока для износостойкой наплавки тонколистовых конструкций. *Автоматическая сварка*, **1**, 64–67.

References

1. Vinokurov, V.A., Grigoryants, A.G. (1984) *Theory of welding strains and stresses*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

2. Kasatkin, B.S., Prokhorenko, V.M., Chertov, I.M. (1987) *Welding stresses and strains*. Kiev: Vyshcha Shkola [in Russian].
3. Makarov, E.L. (1991) Welding and welded materials. *In: 3 Vol. Vol. 1: Weldability of materials*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Lobanov, L.M., Pavlovsky, V.I., Loginov, V.P., Pashchin, N.A. (1990) Regulation of thermodeformational cycles in welding of sheet structures using heat absorbers. *Avtomatic. Svarka*, **9**, 39-46 [in Russian].
5. Gedrovich, A.I., Zhidkov, A.B. (2000) Application of heat sinks for reduction of welding strains and stresses (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 41-44.
6. Zubchenko, A.S., Koloskov, M.M., Kashirsky, Yu.V. (2003) *Steel and alloy grades. 2nd Ed.*, Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of welding works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
8. Panteleenko, F.I., Lyalyakin, V.P., Ivanov, V.P. (2003) *Restoration of machine parts: Refer. book*. Ed. by V.P. Ivanov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2017) Flux-cored wire for wear-resistant surfacing of thin-sheet structures. *The Paton Welding J.*, **1**, 54-57.

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ НА ДЕФОРМАЦІЮ ТОНКИХ СТАЛЕВИХ ПЛАСТИН

А.А. Бабінець

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

У статті наведено порівняльну експериментальну оцінку впливу різних чинників на залишкові деформації при дуговому наплавленні тонких сталевих пластин. Оцінювали вплив хімічного складу, структурного стану і способу закріплення деталі при наплавленні дротами Св-08А, ПП-Нр-25Х5ФМС і Св-Х19Н18Г6М3В2 на пластини зі сталі Ст3 розмірами 3×150×240 мм при різних умовах їх закріплення. Експериментально встановлено, що найбільший вплив на рівень залишкових деформацій надає відмінність у фізичних властивостях і структурному стані основного і наплавленого металів. Результати, отримані в даній роботі, можуть бути використані при розробці технології зносостійкого наплавлення тонколистових конструкцій. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: дугова наплавка, тонка пластина, залишкові деформації, структурні зміни, коефіцієнт теплового розширення, спосіб закріплення, зносостійкий шар

EFFECT OF COMPOSITION AND STRUCTURE OF DEPOSITED METAL ON DEFORMATION OF THIN STEEL PLATES

A.A. Babinets

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper provides a comparative experimental evaluation of effect of different factors on residual deformations in arc surfacing of thin steel plates. Effect of composition, structure state and part fixing method in surfacing with Sv-08A, PP-Np-25Kh5FMS and Sv-Kh19N18G6M3V2 wires on plates from St3 steel of 3×150×240 mm size were evaluated at different conditions of their fixing. It is experimentally determined that differences in physical properties and structural state of base and deposited metal have the highest effect on the level of residual deformations. The results obtained in this work can be used in development of technology of wear-resistant surfacing of thin sheet structures. 9 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, thin plate, residual deformations, structural changes, coefficient of thermal expansion, fixing method, wear-resistant layer

Поступила в редакцію 25.03.2019



**ООО «Фрониус Украина»
проводит семинары:**

20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»

Контакты: тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua