



УДК 621.721.052:539.4.014

**Прохоренко В.М., Перепичай А.О.**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».  
Украина, г. Киев

## ВЛИЯНИЕ БАЗЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЛАСТИН НА ОСТАТОЧНЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ СИММЕТРИЧНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Рассмотрено влияние величины базы линейного закрепления сварного стыкового симметричного соединения по трем осям координат вдоль сварного шва с двух его сторон на характер и величину распределения в среднем поперечном сечении остаточных сварочных пластических деформаций и напряжений. Решение задачи получено методом конечных элементов для соединения размерами 500×200×6 мм из стали 14Г2. По результатам решения сделаны важные выводы.*

*Ключевые слова:* симметричное стыковое соединение, база закрепления; остаточные пластические деформации; остаточные напряжения; среднее поперечное сечение; метод конечных элементов

### Введение

Остаточное напряженно-деформированное состояние сварной конструкции в конечном итоге зависит от тензорного поля остаточных пластических деформаций в данной конструкции, возникших в процессе сварки. Поле пластических деформаций определяется геометрией и свойствами материала конструкции, величиной погонной энергии сварки, характеристиками источника нагрева при сварке, порядком выполнения сварных швов, наличием или отсутствием сборочно-сварочной оснастки, характером воздействия оснастки на конструкцию в процессе сварочного нагрева и охлаждения [1-3].

В течение многолетних теоретических и экспериментальных исследований в области сварочных деформаций, напряжений и перемещений влияние многих факторов на напряженно-деформированное состояние в геометрически простых сварных соединениях и конструкциях достаточно полно изучено и сформированы устойчивые представления о механизмах и направлениях развития этих процессов. Однако, в общем случае трехмерного напряженно-деформированного состояния и даже во многих случаях плоского такого состояния эта трудная и важная научно-практическая проблема все еще далека от полного решения, несмотря на усилия многих отдельных ученых и творческих коллективов.

Основным направлением в указанной проблеме является вопрос о влиянии сборочно-сварочной оснастки на остаточное напряженно-деформированное состояние при сварке. Трудно представить все возможное многообразие видов оснастки, ее назначения, конструктивных форм и геометрических размеров, ее силового и теплового воздействия на конструкцию и др.

В рамках отмеченного направления относительно сборочно-сварочной оснастки в данной работе рассматривается частная научно-техническая задача, связанная с выяснением влияния на остаточное напряженно-деформированное состояние базы установки прижимов с двух сторон шва параллельно его оси при сварке симметричных стыковых соединений, в частности из тонколистовой стали 14Г2. Систематизированного рассмотрения данного вопроса с выяснением сущности происходящих при этом деформационно-силовых процессов в сварном соединении до настоящего времени не было.

### Цель и задачи работы

Цель работы состоит в установлении наличия или отсутствия влияния на остаточное напряженно-деформированное состояние величины базы установки с двух сторон шва вдоль соединения прижимных устройств.

Задачи работы заключаются в разработке конечно-элементной модели сварного соединения на основе его геометрической модели, выборе исходных данных для моделирования температурного нагружения при сварке, граничных условий по закреплению соединения при сварке, определении остаточных пластических деформаций и напряжений, систематизации и визуализации результатов расчетов, обработке и анализе результатов расчетов, формулировке выводов и рекомендаций.

### Основная часть

Задачу решали методом конечных элементов для сварного симметричного стыкового соединения из стали 14Г2 размерами 500×200×6 мм. Ниже

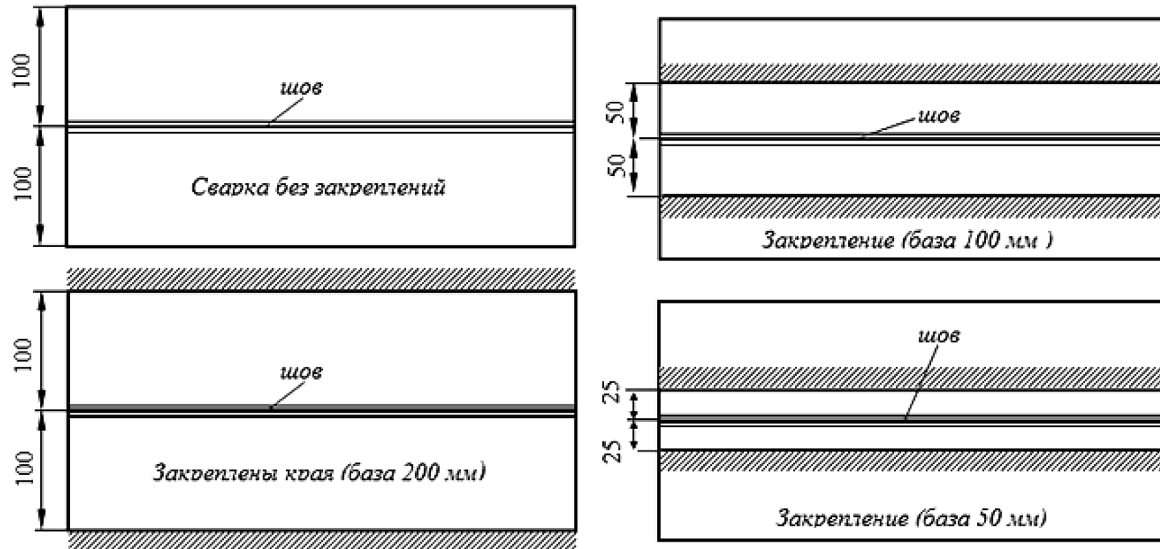


Рис. 1. Варианты закрепления пластин

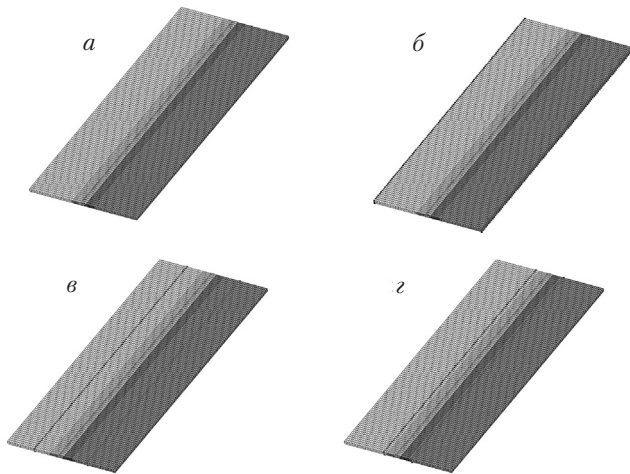


Рис. 2. 3D-модель сварного соединения с вариантами закрепления: а – без закрепления; б – закрепление на базе 200 мм; в – закрепление на базе 100 мм; г – закрепление на базе 50 мм.

приведен алгоритм расчетов методом конечных элементов (МКЭ) для пластин без закрепления при сварке и с закреплением относительно продольной оси стыкового шва на разных базах – 50, 100 и 200 мм. Варианты закрепления сварного соединения в оснастке показаны на рис. 1. На рис. 2 показана

на 3D-модель стыкового сварного соединения с разными вариантами закрепления.

Предварительно созданная на стадии препроцессорной подготовки геометрическая модель пластины с продольным стыковым швом разбивается на необходимое число конечных элементов, задаются термомеханические свойства материала, режим сварки, параметры сварочной ванны (табл. 1), полученные экспериментальным путем, граничные условия (закрепления по трем осям на базах 50, 100 и 200 мм). Число конечных элементов выбирается исходя из требуемой точности результата расчета. Далее выполняется объединенный термомеханический анализ с возможностью больших перемещений (*Nonlinear Geometry*) и автоматической стабилизацией рассеяния энергии, время анализа устанавливается таким, чтобы обеспечить полное охлаждение модели до температуры окружающей среды (*Ambient Temperature*) – 1200 секунд.

С целью моделирования при MAG сварке объёмного источника теплоты Goldak J. [4] проведена серия экспериментов на образцах из стали 14Г2 толщиной 6 мм для определения реальных значений длины, ширины и глубины сварочной ванны при выбранном режиме сварки. Результаты измерения размеров сварочной ванны приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима сварки и размеры сварочной ванны

Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, мм/с	КПД сварочной дуги, %
200	24	5	67
Ширина ванны, мм		Длина ванны, мм	Глубина ванны, мм
10		20	6

Необходимые для расчета МКЭ свойства стали 14Г2 приведены в табл. 2, 3. Химический состав стали необходим для моделирования фазовых превращений и связанных с ними термомеханических процессов, таких как образование латентного тепла, трансформационная пластичность и др.

ния прижимов оснастки существенно влияет на ширину зоны остаточных пластических деформаций укорочения. С увеличением базы закрепления оснастки ширина зоны в сумме с двух сторон шва увеличивается – 92, 106 и 188 мм соответственно при базах закрепления 50, 100 и 200 мм. При отсут-

Таблица 2

**Химический состав стали 14Г2**

C	Si	Mn	S	P	Cr	Al
0,085	0,11	1,54	0,04	0,04	0,41	1,16

Таблица 3

**Термомеханические свойства стали 14Г2**

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_T, \text{МПа}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C, \text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$
20	234	2,13	–	52	7859	–
100	234	2,03	11,6	50,6	7834	486
200	234	1,99	12,6	48,6	7803	498
300	234	1,9	13,1	46,2	7770	514
400	234	1,82	13,6	42,8	7736	533
500	234	1,72	14,1	39,1	7699	555
600	57	1,6	14,6	35,8	7659	584
700	42	–	14,8	32	7617	636
800	28	–	12,9	–	7624	703
900	27	–	–	–	7600	703
1000	25	–	–	–	–	–
1300	7	–	–	–	–	–
1500	1,3	–	–	–	–	–

Где,  $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C$  – удельная теплоемкость материала,  $\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ . С целью решения связанной задачи термоупруго-пластичности моделирование осуществлялось линейным объемным 8-узловым элементом. Для материала пластины принималась модель пластичности с изотропным упрочнением. В результате моделирования получено распределение остаточных пластических деформаций и напряжений в среднем поперечном сечении. На рис. 3...6 представлены графики остаточных пластических деформаций в среднем поперечном сечении соединения: вдоль шва, в поперечном к шву направлении и по толщине металла для случаев сварки пластин без закреплений (рис. 3), а также при их закреплении на базах 50, 100 и 200 мм (соответственно рис. 4, 5, 6).

Сопоставление графиков на данных рисунках позволяет утверждать, что величина базы закрепле-

ствия закрепляющей оснастки ширина зоны пластических деформаций значительно меньше – 74 мм (рис. 1).

Ширина зоны продольных пластических деформаций укорочения определяется продольной подвижностью в процессе нагрева свариваемых пластин и шириной зоны максимальных температур при сварке, равных не менее чем  $\epsilon_T/\alpha$  ( $\epsilon_T$  – упругая деформация на уровне предела текучести,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения). Если продольная подвижность свариваемых пластин при сварке ограничена оснасткой или шириной свариваемых пластин, то продольные пластические деформации укорочения на стадии нагревания могут возникать и при незначительных температурах, в пределе (при абсолютной неподвижности пластин) при температуре, равной  $\epsilon_T/\alpha$ , то есть при температуре около 100...150  $^\circ\text{C}$ .

Постановка жестких прижимов вдоль шва на выбранной базе создает в некоторой окрестности зоны прижима значительные ограничения про-

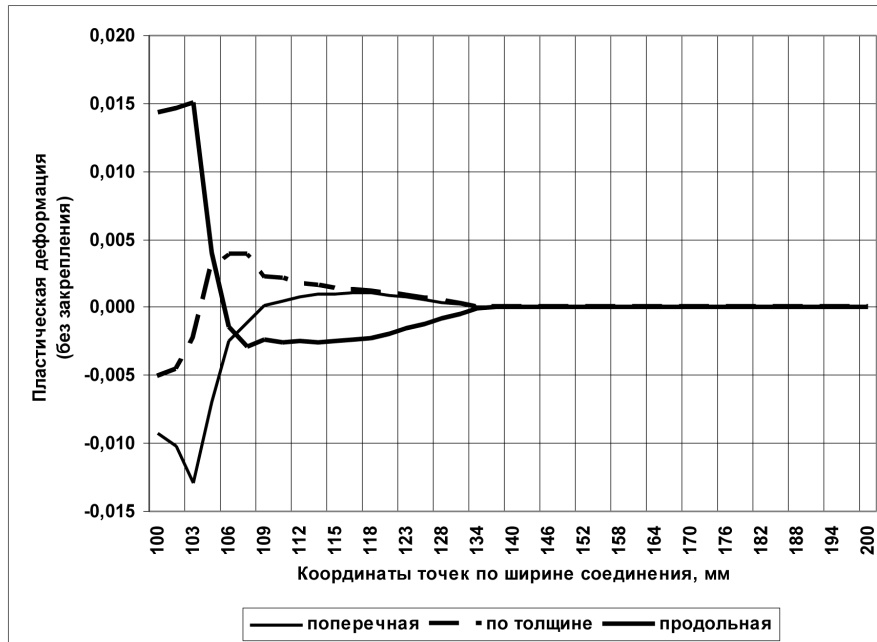


Рис. 3. Распределение остаточных пластических деформаций в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке без закрепления

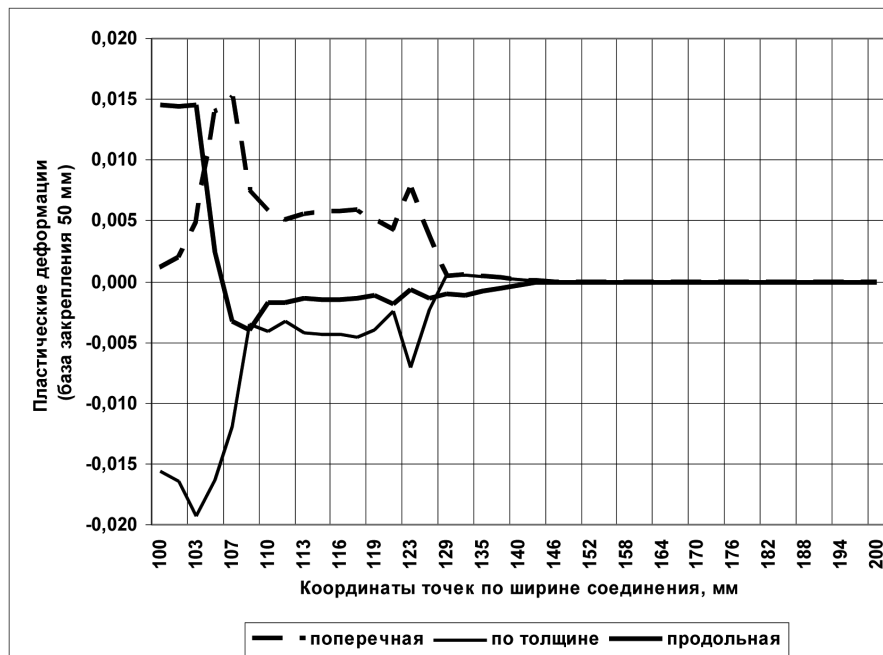


Рис. 4. Распределение остаточных пластических деформаций в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 50 мм

дольным перемещениям свариваемых пластин, в результате чего зона продольных напряжений сжата на стадии нагревания значительно возрастает.

Если ширина базы закрепления такова, что температура  $\epsilon_T/\alpha$  не выходит за пределы базы закрепления свариваемых пластин, ширина зоны пластических деформаций укорочения будет больше, чем

при сварке в незакрепленном состоянии, однако не больше ширины базы закрепления оснастки.

При сравнительно небольшой базе закрепления оснастки, как, например, в нашем случае на базе 50 мм, то температура  $\epsilon_T/\alpha$  может быть за пределами базы закрепления оснастки. В нашем случае она достигла необходимой величины на удалении от

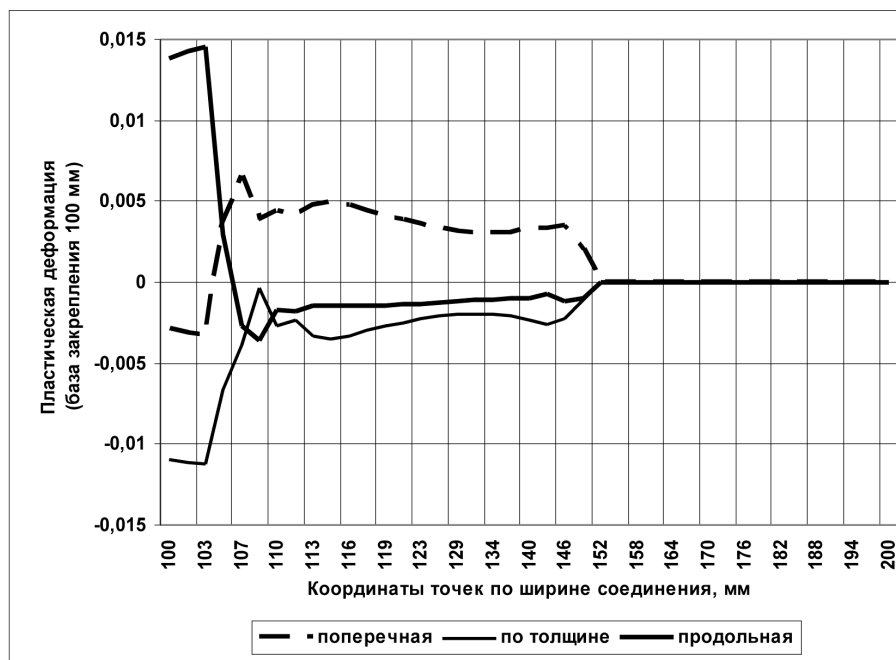


Рис. 5. Распределение остаточных пластических деформаций в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 100 мм

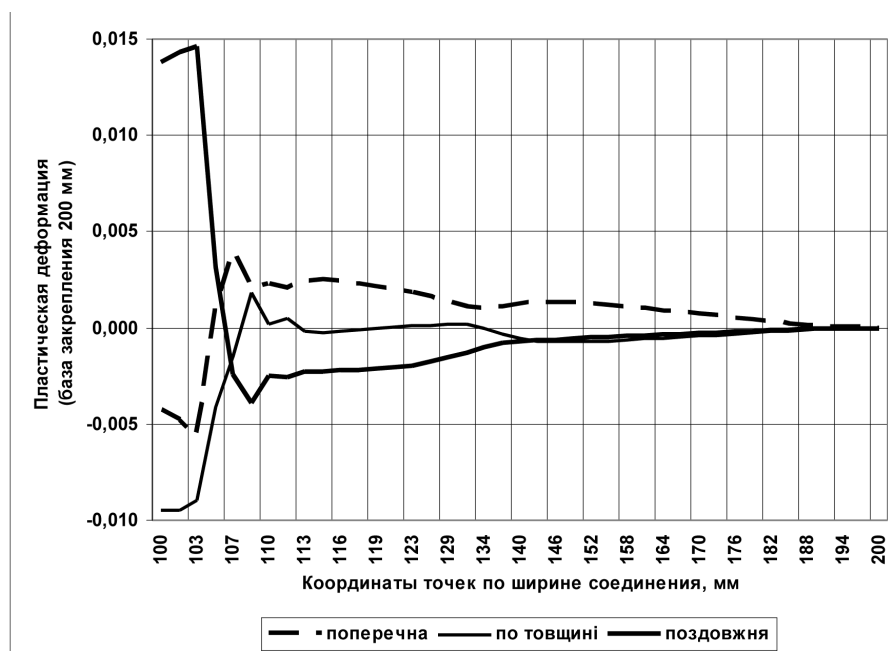


Рис. 6. Остаточные пластические деформации в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 200 мм

оси шва на 46 мм в каждую сторону, т.е. база температур больших за составила 92 мм, а база оснастки – 50 мм.

При закреплении прижимов на базе 100 мм имеем ширину зоны пластического укорочения, равную 106 мм, т.е. ширина этой зоны практически равна ширине базы закрепления оснастки.

Наконец, при закреплении прижимов на базе 200 мм (т.е. по боковым кромкам соединения) ширина зоны пластического укорочения достигает, в рамках исследованных размеров соединений и принятого режима сварки, максимальной ширины 188 мм, что практически равно ширине сварного соединения. Это означает, что для такой ширины

соединения и базы закрепления оснастки почти на всей ширине соединения имеет место закрепление соединения, близкое к жесткому закреплению. Температура  $\epsilon_T/\alpha$  находится в точке, удаленной от оси шва на 94 мм. В этой связи может возникнуть вопрос, почему на базе закрепления оснастки 100 мм зона пластического укорочения ограничена расстоянием от оси шва всего в 46 мм, хотя, как выше установлено, температура  $\epsilon_T/\alpha$  достигает точки, удаленной от оси шва на 94 мм. В этом случае все дело в том, что продольная жесткость свободных кромок свариваемых пластин за пределами базы закрепления прижимов оснастки по мере удаления от линий установки прижимов быстро уменьшается и потому в таких местах соединения температура  $\epsilon_T/\alpha$  уже не играет решающего значения в достижении упругими продольными деформациями укорочения на уровне  $-\epsilon_T$ .

Если кривые остаточных продольных пластических деформаций в пределах ширины шва практически идеально совпадают друг с другом, то этого нельзя сказать об остаточных пластических деформациях в металле поперечного направления и в направлении толщины металла, что отчетливо видно из сравнения рис. 1...4. Поскольку продольные пластические деформации в металле шва не зависят от базы закрепления свариваемых пластин или вовсе от ее отсутствия, сумма поперечных и в направлении толщины остаточных пластических деформаций должна быть с обратным знаком (укорочение) в точности равна продольным пластическим деформациям в силу того, что должно выполняться условие несжимаемости материала при пла-

стическом деформировании. Если внимательно присмотреться к рисункам 3...6, то это требование полностью выполняется.

На рис. 7...10 представлены графики распределения в среднем поперечном сечении соединения продольных, поперечных и по направлению толщины металла остаточных сварочных напряжений при сварке без закрепления и с закреплением в оснастке, как рассмотрено выше. Сразу можно отметить, что поперечные напряжения и направленные по толщине металла особого интереса не представляют ввиду их незначительной величины в целом.

Что касается продольных напряжений, то следует отметить значительное их уменьшение в некоторой области вблизи сварного шва. Это объясняется образованием в шве и прилегающем основном металле структур мартенситного типа, что характерно для данной стали. При образовании таких структур увеличивается объем металла и происходит некоторая компенсация относительного объема остаточного продольного укорочения в зоне остаточных пластических деформаций укорочения, что и приводит к уменьшению остаточных напряжений как продольных, так и поперечных и направленных по толщине металла, что хорошо видно на представленных рисунках.

Следующим важным моментом является некоторая неуравновешенность эпюры остаточных продольных напряжений на рис. 7...10. Часть эпюры со знаком плюс (растяжение) заметно больше части эпюры со знаком минус. Это связано с образованием некоторого прогиба сварного соединения и выпучиванием лицевой поверхности

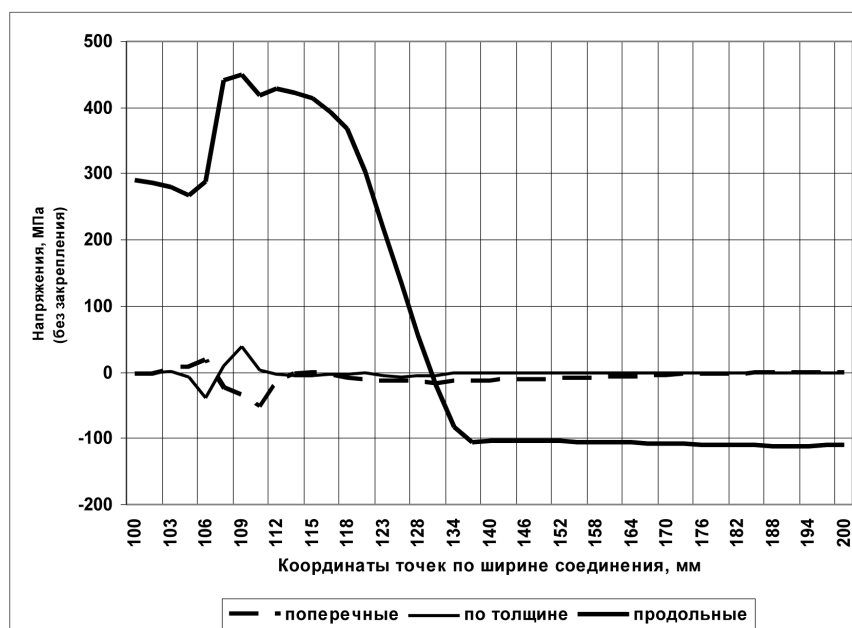


Рис. 7. Остаточные напряжения в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке без закреплений

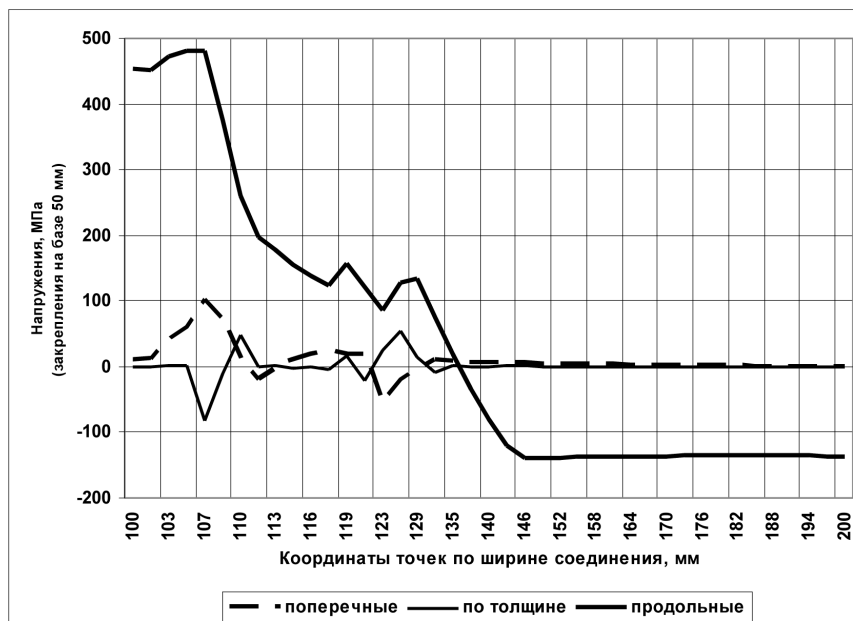


Рис. 8. Остаточные напряжения в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 50 мм

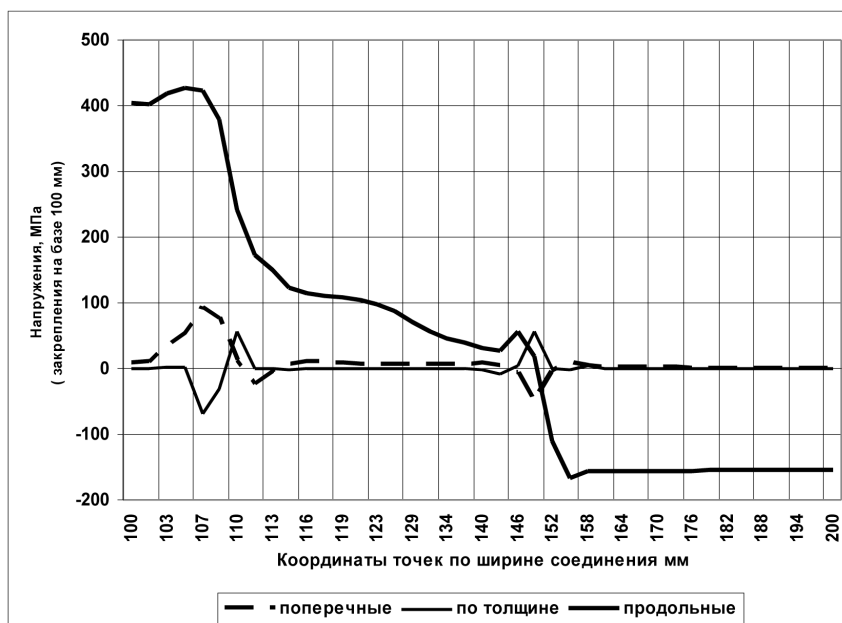


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 100 мм

вверх. По этой причине ее лицевая поверхность растягивается, а обратная сжимается в продольном направлении, что и определяет такой вид эпюры этих напряжений. В целом же по всей площади поперечного сечения соединения эпюра этих напряжений полностью уравновешена, как и должно быть.

Некоторое проседание кривой продольных напряжений в зоне растяжения при сварке соедине-

ния в закрепленном виде по сравнению со сваркой без закреплений объясняется перераспределением их после освобождения соединения из закреплений в конце охлаждения. Зона растягивающих напряжений в основном равна ширине зоны остаточных пластических деформаций укорочения, за исключением случая базы закрепления оснастки, равной ширине соединения. Однако это отдельный вопрос и в данной работе не будем его рассматривать. На

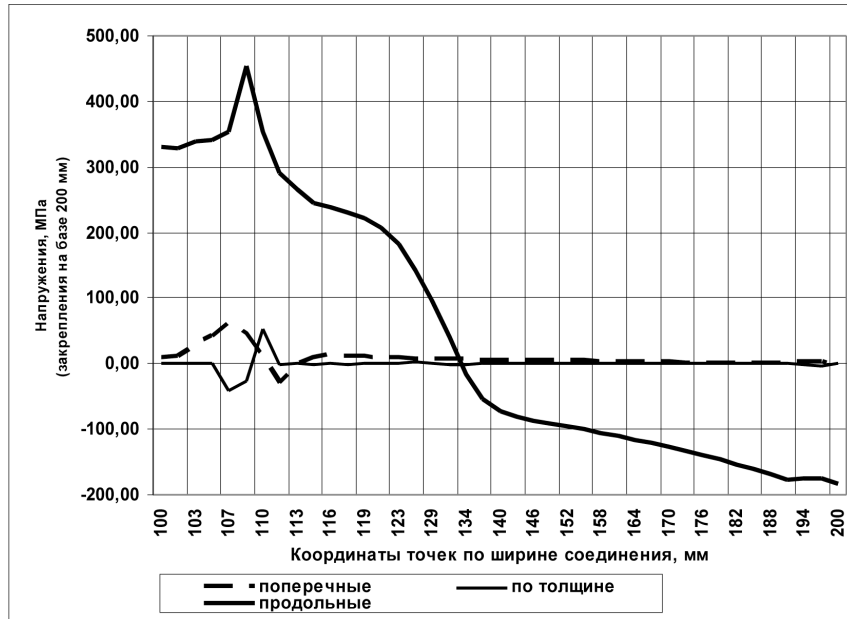


Рис. 10. Распределение остаточных напряжений в среднем поперечном сечении сварного соединения при сварке с закреплением на базе 200 мм

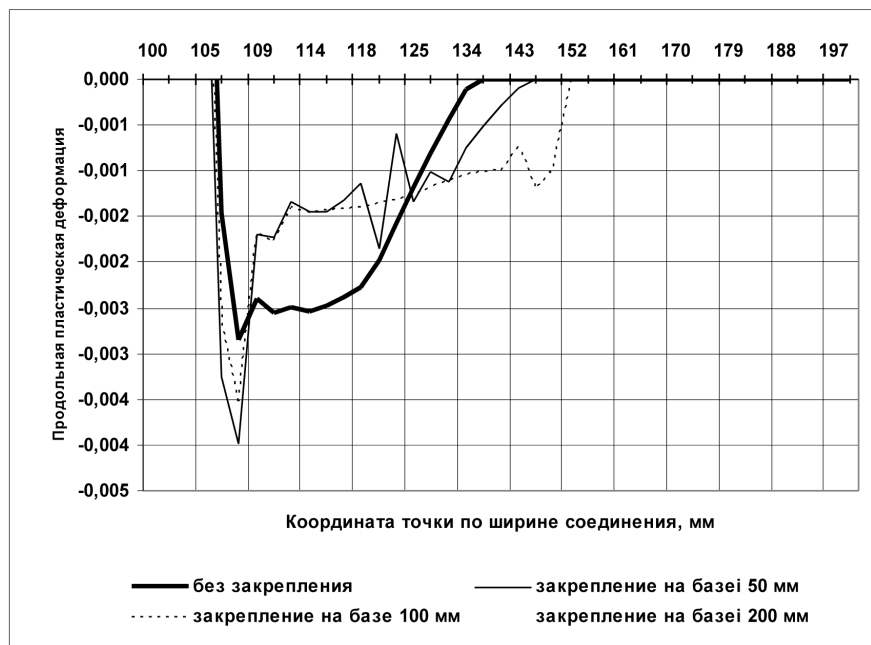


Рис. 11. Остаточные продольные пластические деформации укорочения в основном металле при различных базах закрепления пластин при сварке

рис. 11, 12 представлены для различных баз закрепления пластин при сварке остаточные продольные пластические деформации укорочения в основном металле и остаточные продольные пластические деформации удлинения в металле шва, который подвергался расплавлению в процессе сварки. Точка перехода продольных пластических деформаций удлинения в металле шва через нуль находится на границе сплавления металла шва с основ-

ным металлом сварного соединения, который при нагреве не расплавлялся и сохраняет историю своего нагружения на стадии нагрева, когда возникали значительные по величине пластические деформации укорочения, формирующие часть ширины зоны остаточного продольного пластического укорочения при сварке, относящуюся к основному металлу соединения.



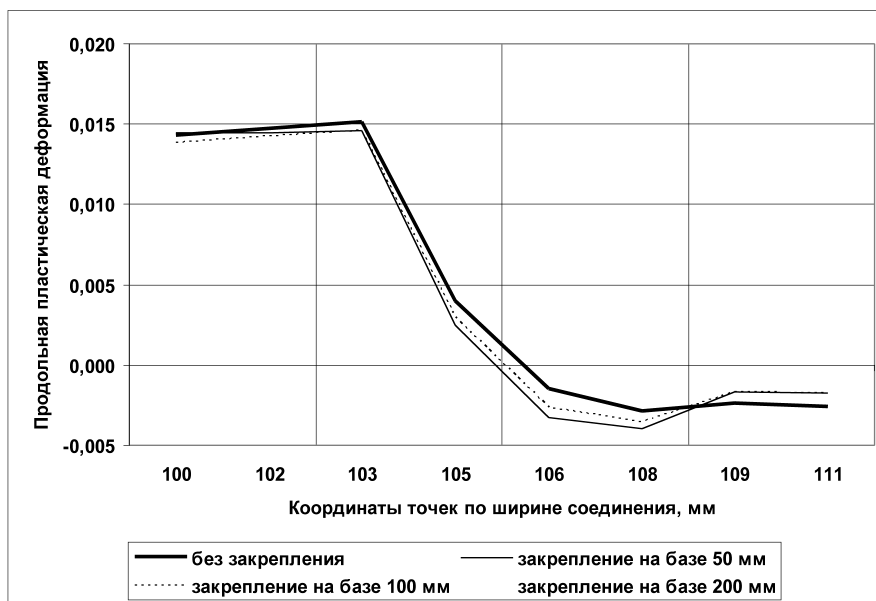


Рис. 12. Остаточные продольные пластические деформации удлинения в металле шва, который подвергался расплавлению в процессе сварки

### Выводы

1. Наименьшая ширина зоны остаточных продольных пластических деформаций укорочения возникает при сварке соединения без закрепления его в оснастке.
2. С увеличением базы закрепления соединения ширина зоны остаточных продольных пластических деформаций укорочения возрастает и для соединения, рассмотренного в работе (ширина 200 мм), практически равна ширине соединения (при базе закрепления, равной ширине соединения).
3. В металле шва формируются остаточные продольные пластические деформации удлинения, поскольку он расплавлялся при сварке, а в основном металле – пластические деформации укорочения.
4. В остаточном состоянии соединение получает некоторый продольный выгиб в сторону лицевой поверхности, в результате чего эпюры остаточных продольных напряжений в на лицевой и тыльной поверхностях несколько неуравновешенны.
5. В металле шва наблюдается некоторое уменьшение продольных напряжений по причине образования мартенситных структур.
6. Формирование ширины зоны остаточных пластических деформаций укорочения определяется размерами зоны жесткого закрепления соединения в окрестности прижимов оснастки, удаленностью этой зоны в стороны от оси шва и дальностью распространения от оси шва максимальной температуры, при которой для данной продольной жесткости соединения упругая продольная деформация укорочения на стадии нагревания достигает значения.

### Литература

- [1] Прохоренко В.М., Прохоренко О.В. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб./ – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 268 с. – Бібліогр.: с. 267. – 400 пр. ISBN 978-966-622-331-2
- [2] Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
- [3] Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.
- [4] John A. Goldak. Computational welding mechanics. – О.: USA, 2005. – 325 р.

### Символьные обозначения, индексы, аббревиатуры

- $T$  – температура, °С;  
 $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  
 $E$  – модуль упругости, МПа;  
 $\epsilon_{упр}^{нагр}$  – упругая деформация на стадии нагревания при сварке;  
 $\epsilon_T$  – упругая деформация, соответствующая пределу текучести;  
 $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  
 $c_p$  – объемная теплоемкость,  $\text{Дж}/^\circ\text{C}\cdot\text{мм}^3$ ;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ ;  
 $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $C$  – удельная теплоемкость материала,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;  
 МКЭ – метод конечных элементов;  
 MAG – сварка плавящимся электродом в активных газах.

Prokhorenko V.M., Perepichay A.A.

National Technical University of Ukraine "Kyiv polytechnic institute". Ukraine, Kyiv

### EFFECT OF BASE FIXING PLATES ON THE RESIDUAL PLASTIC DEFORMATION AND WELDING VOLTAGE SYMMETRICAL JOINTS

*The effect of magnitude of the base line of a butt weld joint fixing symmetric of the three coordinate axes along the weld with two of its sides on the distribution and magnitude in the average cross section of residual welding stresses and plastic deformations. Solution of the problem is obtained by the method of finite elements for the weld joint with dimensions of 500×200×6 mm and steel 14G2. By the results of decisions made important conclusions.*

*Keywords:* symmetric butt joint; fixing base; residual plastic deformation; residual stresses; the average cross-section; the finite element method

#### References

- [1] Prokhorenko V.M., Prokhorenko O.V. Napruzhenja ta deformacii u zvarnih z'ednannjah i konstrukcijah [Tekst ]: navch. posib./ . – K.: NTUU «KPI», 2009. – 268 s. – Bibliogr.: s.267. – 400 pr.ISBN 978-966-622-331-2
- [2] Vinokurov V.A., Grigor'janc A.G. Teorija svarochnyh deformacij i naprjazhenij. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 280 s.
- [3] Gatovskij K.M., Karhin V.A. Teorija svarochnyh deformacij i naprjazhenij. Ucheb. pos. Leningr. korablestr. in-t, 1980. – 331 s.
- [4] John A. Goldak. Computational welding mechanics. – O.: USA, 2005. – 325 p.