



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-93-104>
УДК 621.785.4: 791

Поступила 13.10.2025
Received 13.10.2025

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКЕ ТРУБЫ ДИАМЕТРОМ 48 ММ И ТОЛЩИНОЙ 5 ММ ИЗ СТАЛИ Р91

А. Л. МИНЬКОВ, М. Н. ФИЛИППОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: minkov@bntu.by

Жаропрочная сталь Р91 с высоким содержанием хрома используется при изготовлении элементов котлов и паропроводов, работающих под давлением пара до 31 МПа и при температурах до 600 °C. Однако повышенная диффузионная ползучесть, обусловливающая образование в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения трещин III или IV типов, значительно снижает срок эксплуатации сварных конструкций из данной стали. Одна из причин образования трещин при эксплуатации паропроводов – наличие остаточных после сварочных растягивающих напряжений. Цель работы – определение влияния до сварочной и после сварочной термической обработки на остаточные напряжения и деформации при многопроходной сварке трубной заготовки.

Ключевые слова. Сталь Р91, сварные соединения, до сварочная и постсварочная термическая обработка, моделирование, остаточные напряжения, деформации.

Для цитирования. Миньков, А.Л. Расчет влияния термической обработки и фазовых превращений на напряжения и деформации при многопроходной сварке трубы диаметром 48 мм и толщиной 5 мм из стали Р91 / А.Л. Миньков, М.Н. Филиппов // Литье и металлургия. 2025. № 4. С. 93–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-93-104>.

CALCULATION OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND PHASE TRANSFORMATIONS ON STRESSES AND DEFORMATIONS IN MULTIPLE-PASS WELDING OF A PIPE WITH A DIAMETER OF 48 MM AND A THICKNESS OF 5 MM OF STEEL GRADE P91

A. L. MINKOV, M. N. FILIPPOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: minkov@bntu.by

High-temperature steel P91 with a high chromium content is used in the production of boiler and steam line elements that operate under steam pressure up to 31 MPa and at temperatures up to 600 °C. However, the increased diffusion creep, which causes the formation of type III or IV cracks in the weldment heat-affected zone (HAZ), significantly reduces the service life of welded structures made of this steel. One of the causes of crack formation in steam pipelines during operation is the presence of residual tensile stresses after welding. The purpose of the study: to determine the influence of pre- and post-weld heat treatment on residual stresses and deformations during multi-pass welding of pipe blanks.

Keywords. P91 steel, welded joints, pre-welding and post-welding heat treatment, modeling, residual stresses, deformations.

For citation. Minkov A. L., Filippov M. N. Calculation of the influence of heat treatment and phase transformations on stresses and deformations in multiple-pass welding of a pipe with a diameter of 48 mm and a thickness of 5 mm of steel grade P91. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 4, pp. 93–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-93-104>.

Сталь Р91 – жаропрочная феррито-мартенситная была разработана в США в середине 70-х годов XX в для изготовления толстостенных элементов котлов, а также для паропроводов ядерных реакторов. Ее отличительная особенность – наличие помимо основных легирующих элементов (хром – 9% и молибден – 1%) небольших добавок ванадия, ниобия и азота [1]. Химический состав стали Р91 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали марки Р91 [1]

Элемент	C	Cr	Mo	Si	Mn	V	Nb	N	Fe
Mac. %	0,10	9,00	0,92	0,23	0,46	0,18	0,08	0,084	Основа

В энергетике эксплуатация трубопроводов происходит в условиях высоких температур до 650 °C и давлениях 24–30 МПа. При этих условиях основным фактором, определяющим надежную и безотказную работу трубопроводов, является качество сварных соединений, которое зависит от наличия дефектов, структурного фактора, а также остаточных напряжений. Согласно [2], при эксплуатации паропроводов разрушение с вероятностью 95 % происходит путем образования трещин III или IV типа в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения. Поэтому мониторинг упругопластических процессов в ЗТВ имеет решающее значение, поскольку ЗТВ является критической областью, где механические свойства металла значительно изменяются из-за теплового воздействия сварочной дуги, что влияет на общую прочность и надежность сварных соединений. Мониторинг упругопластических деформаций и фазовых превращений в ЗТВ позволит оптимизировать параметры сварки (сила тока, скорость сварки, количество проходов) для минимизации динамических и остаточных напряжений в ЗТВ.

ЗТВ стали Р91 [3] состоит из зоны сплавления, имеющей повышенную твердость и пониженную прочность, зоны перегрева, имеющую крупнозернистую структуру, зоны нормализации, имеющей мелкозернистую структуру. Далее идет зона неполной перекристаллизации, в структуре которой наблюдаются как крупные, так и мелкие зерна. Зона неполной перекристаллизации заканчивается участком синеломкости, который не имеет структурных изменений, но в нем происходят процессы отпуска и старения.

С целью определения чувствительности металла к образованию горячих и холодных трещин при сварке был проведен расчет углеродного эквивалента стали Р91, показателя Уилксона и параметра Ито-Бессио (табл. 2).

Таблица 2. Углеродный эквивалент стали Р91, показатель Уилксона, параметр Ито-Бессио

Оценка чувствительности изделия к образованию холодных трещин (Параметр Ито-Бессио)																	
P_{cm}=	0,1	+	0,23	+	0,46	+	0	+	0,2	+	9	+	0,92	+	0,18	+	0 = 0,657333
	30		20		20		60		20		20		15				
P_w=	0,65733333	+	0,64*(2	...	7	) - 0,93	+	69*(	8,000	)	=		0,66	0,72			
			60					400000									
HCS=	0,1	(	0,025	+	0,025		+	0,0092	+	0,002	)		*10^3		=		0,53
	1,38		+	9	+			0,92	+	0,18							
Углеродный эквивалент основного металла																	
С_{экв}	0,1	+	0,23	0,46	+	9	+	0,92	+	0,18	+	0,2	+	0	=	1,156	
			24	6				10				15					

Из таблицы видно, что сталь Р91 не склонна к горячим трещинам. Но из-за образования мартенситной (шов) и мартенсито-ферритной структуры в зоне смещения и высокого показателя параметра Ито-Бессио сталь Р91 имеет высокую склонность к образованию холодных трещин, а соответственно требуется до сварочный предварительный подогрев.

Ранее в работе [4] было проведено моделирование TIG сварки в четыре прохода трубной заготовки диаметром 48 мм и толщиной 5 мм из стали Р91 с целью определения динамики изменения размеров температурного интервала хрупкости (ТИХ) 800–500 °C в зависимости от количества проходов. На рис. 1 показано распределение средней температуры от оси шва через ЗТВ к основному металлу. При каждом последующем проходе от первого до четвертого увеличивается зона ТИХ от 5 мм после первого прохода, 13 мм после второго и 22 мм после третьего, а после четвертого – 33 мм. ТИХ после второго прохода смещается от оси шва, но не перекрывается с зоной ТИХ после первого прохода, а находится вплотную, не пересекаясь. Зоны ТИХ после второго и третьего проходов пересекаются, тем более, чем больше проходов было выполнено.

В настоящей работе изменения температуры, упругопластических напряжений и деформаций при сварке осуществляли путем компьютерного моделирования в среде ANSYS/LS-DYNA. Моделирование позволяет рассчитать не только изменения температуры в различных точках сварного шва и ЗТВ при сварке, но и распределение остаточных напряжений и деформаций, что помогает оценить риск возникновения трещин. Для моделирования напряженно-деформированного состояния сварных конструкций наибольшее распространение получили приближенные инженерные методы расчета, основанные на знании значений функции усадки сварного шва и применении методов теории упругости. При этом для решения задач применяют метод конечных элементов (МКЭ) [4]. В данной работе использовали термопластический анализ в сочетании с МКЭ в трехмерной постановке при нагреве и охлаждении

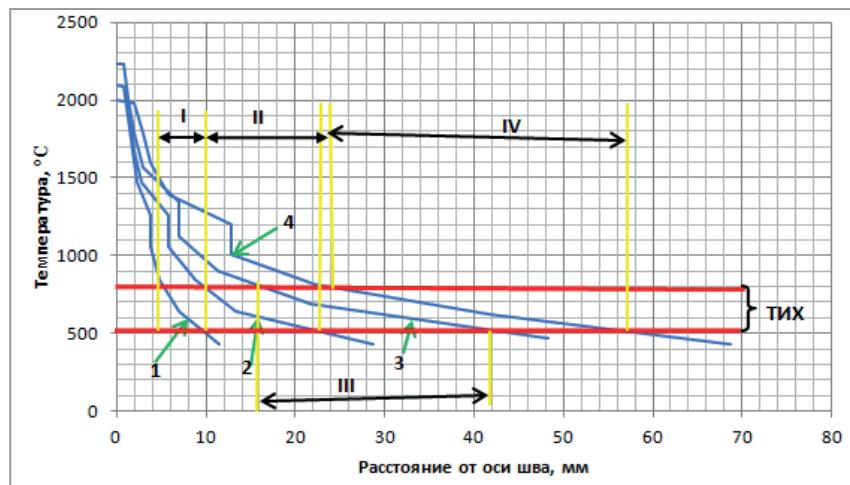


Рис. 1. Распределение средней температуры от оси шва через ЗТВ к основному металлу [4] :
 1–4 – изменение температуры после соответствующего прохода;
 I–IV – размеры температурного интервала хрупкости (ТИХ), соответствующие данному проходу

осесимметричной цилиндрической заготовки, что позволяет определить влияние последовательности процесса сварки на изменение динамических и остаточных напряжений и деформаций.

Таким образом, моделирование дает возможность оптимизировать параметры сварки и сократить количество дорогостоящих экспериментов, необходимых для повышения свариваемости, а также визуализировать распределения температуры и напряжений.

Цель работы – моделирование влияния до сварочной и после сварочной термической обработки при многопроходной сварке трубной заготовки диаметром 48 мм и толщиной 5 мм на динамические и остаточные напряжения и деформации.

Описание модели расчета в среде ANSYS/LS-DYNA

Моделирование проводили для аргонодуговой сварки с неплавящимся электродом погруженной дугой (TIG) при коэффициенте эффективности нагрева $\eta_{\text{и}} = 0,65$; $I_{\text{cb}} = 100 \text{ A}$; $U_{\text{cb}} = 13 \text{ В}$, $v_{\text{cb}} = 2 \text{ мм/с}$ и погонной энергии сварки $q_{\text{п}} = 4,224 \text{ кДж/см}$, количество проходов – четыре с V-образной разделкой кромок. Максимальная температура источника тепла корневого и облицовочного швов около 2500 °C. Количество элементов сетки – 1 029 063 и шагом в 0,5 мм. Размеры трубы – 48,5×5,08 мм.

Теплофизические и механические свойства стали P91, использованные при расчете, приведены на рис. 2 [5].

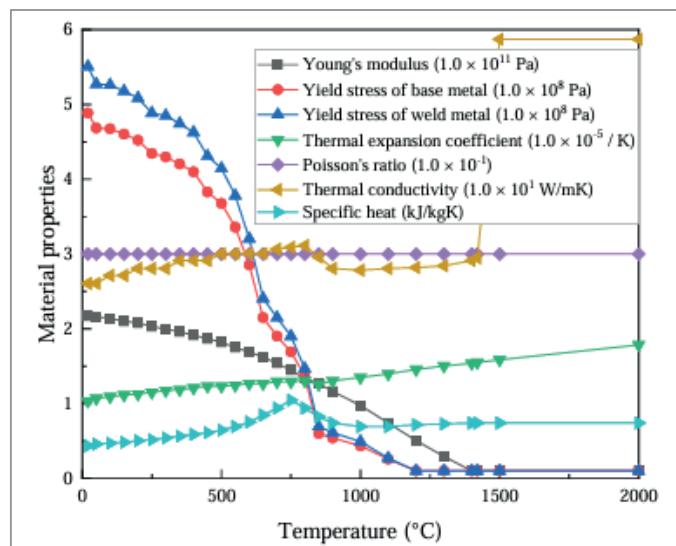


Рис. 2. Термофизические и механические свойства стали P91 [5]

Моделирование осуществляли в два этапа: на первом этапе проводили термический анализ для получения распределения тепловых полей; на втором этапе по результатам изменения температурных полей,

которые загружали как исходные данные для упругопластического анализа, производили расчет напряжений и деформаций в объеме всей конструкции.

В начале моделирования (рис. 3) создавалась конечно-элементная сетка в ANSYS с заданием траектории сварки, физических свойств металла шва и основного металла (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуансона, коэффициент линейного термического расширения, предел текучести, предел прочности). Далее с использованием программы LS-Prepost полученный *k*-файл запускали в LS-RUN и производили идентификацию групп элементов и узлов. Группы элементов и узлов позволяют указать начальную и конечную точку сварки, а также определить траекторию сварки, основной металл и металл шва. В блоке LS-DYNA задаются параметры моделирования: интенсивность источника тепла, скорость сварки, граничные условия, после этого проводится расчет.

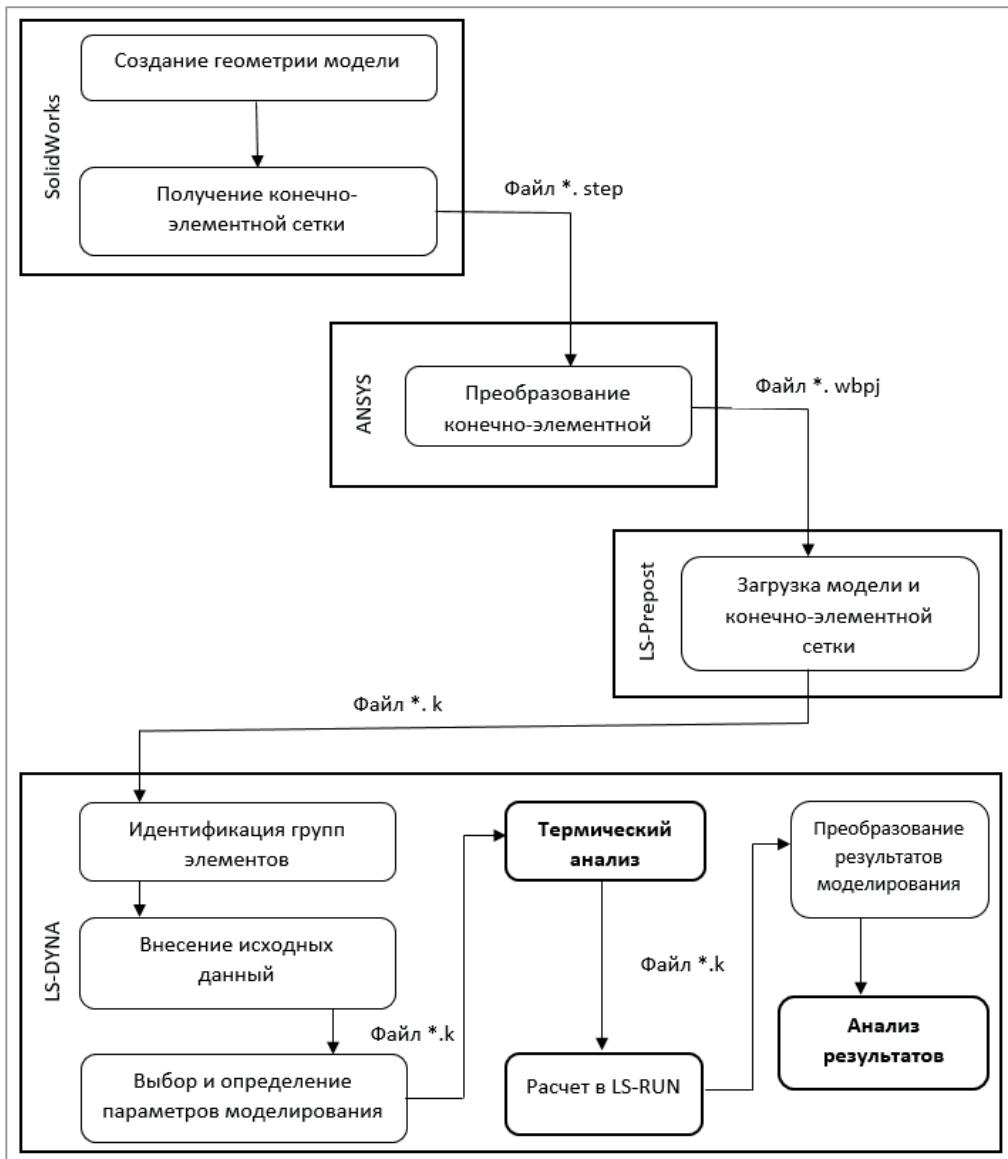


Рис. 3. Последовательность действий при моделировании термических полей и упругопластический анализ

Цель моделирования на первом этапе – определение температурного поля в процессе сварки. Дифференциальное уравнение теплопроводности в трехмерном пространстве имеет вид [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{Q}{c_p}, \quad (1)$$

где T – температура, $^{\circ}\text{C}$; a – температуропроводность, $\text{m}^2/\text{с}$; τ – время, с ; ∇^2 – оператор Лапласа; Q – входящий тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^3$; c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{с})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Входящий тепловой поток идет на нагрев исследуемой цилиндрической заготовки и конвекционные и радиационные потери тепла на открытых поверхностях:

$$Q = Q_d - Q_k - Q_i, \quad (2)$$

где Q_d – тепловой поток от сварочной дуги, Вт; Q_k , Q_i – соответственно потери тепла за счет конвекции и излучения, Вт:

$$Q_k = a \int (T - T_\infty) dS, \quad (3)$$

где a – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°C); T_∞ – температура окружающей среды, °C; dS – площадь, м²;

$$Q_i = k \kappa \int (T^4 - T_\infty^4) dS, \quad (4)$$

где k – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·°C⁴); κ – коэффициент теплообмена с поверхности.

В данной работе источником тепла служит трехмерная неосесимметрическая модель, в которой плотность теплового потока распределяется по закону Гаусса в виде двойного полуэллипсоида. Модель двойного полуэллипсоида состоит из двух полуэллипсоидов: один – для передней поверхности сварного бассейна, а другой – для задней поверхности. При движении сварочной дуги вдоль оси Z (рис. 4) распределение плотности мощности внутри переднего полуэллипсоида описывается уравнением:

$$Q_d = \frac{6 \cdot \sqrt{3} F \cdot Q_0}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \left(\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} + \frac{(Z - Z_0 - vt)^2}{c_1^2}\right)\right), \quad (5)$$

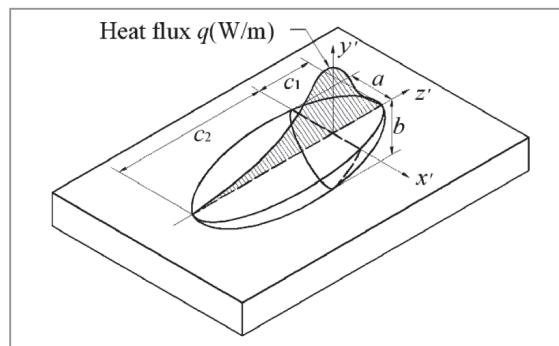


Рис. 4. Модель двойного полуэллипсоида Голдака [7]

а распределение плотности мощности внутри заднего полуэллипсоида – уравнением:

$$Q_d = \frac{6 \cdot \sqrt{3} F \cdot Q_0}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \left(\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} + \frac{(Z - Z_0 - vt)^2}{c_2^2}\right)\right), \quad (6)$$

$$Q_0 = \eta I_{cb} U_{cb}, \quad (7)$$

где a , b , c – полуоси эллипсоида, м; Q_0 – тепловой поток, Вт; η – КПД сварки, I_{cb} – сила тока, А; U_{cb} – напряжение, В; v – скорость сварки, мм/с; t – время сварки, с; F – доля тепла, выделяемая в переднем или заднем полуэллипсоиде, Вт; Z – положение источника нагрева в текущий момент; Z_0 – положение источника нагрева в начале моделирования; c_1 – длина переднего полуэллипсоида; c_2 – длина заднего полуэллипсоида.

Модель в виде двойного полуэллипсоида Голдака более точно учитывает вытянутую форму реального распределения плотности мощности и обеспечивает улучшенное приближение к форме и глубине проплавления сварного шва (рис. 4).

Далее производили расчет на основе разработанной тепловой модели нагрева и охлаждения осесимметрической трубной заготовки по поверхности движущимся точечным источником нагрева методом численного решения задач термоупругости и термопластичности с целью определения возникающих температурных полей и сгенерированных ими упругопластических напряжений и деформаций.

Результаты моделирования

Моделирование проводили при сварке в четыре прохода трубной заготовки диаметром 48,5 мм и толщиной 5,08 мм. Скорость сварки – 2 мм/с, погонная энергия – 4,224 кДж/см. На рис. 5 показаны модель тонкостенной трубной заготовки и элемент исследования 1011 735, который находится в непосредственной близости от шва и испытывает максимальные термические и механические нагрузки при сварке.

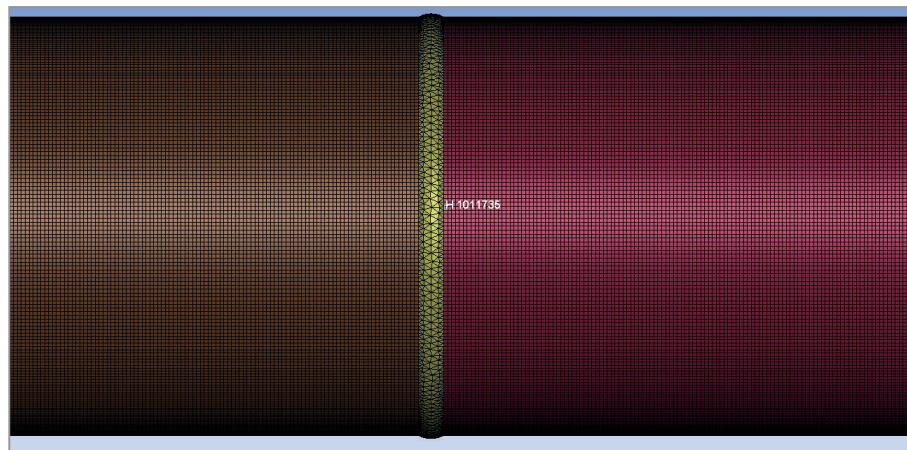


Рис. 5. Модель многопроходного тонкостенного трубопровода и элемент сетки исследования 1011735

На рис. 6 показан расчетный термический цикл при четырехпроходной сварке стали Р91. Очевидно, что температура контрольного элемента после первого прохода составляет около 1100 °С, после второго – 1750, после третьего – 2000, после четвертого – 1500 °С. Отметим, что температура вначале быстро растет, с первого до третьего цикла, а затем монотонно падает. При этом наблюдается на половине графика подъема температуры цикла сварки небольшое падение на 250 °С при втором и третьем циклах. На первом и четвертом циклах данного явления не наблюдается. Также наблюдается после четвертого прохода во временному интервале 350–375 с небольшой температурный скачок на 200–250 °С.

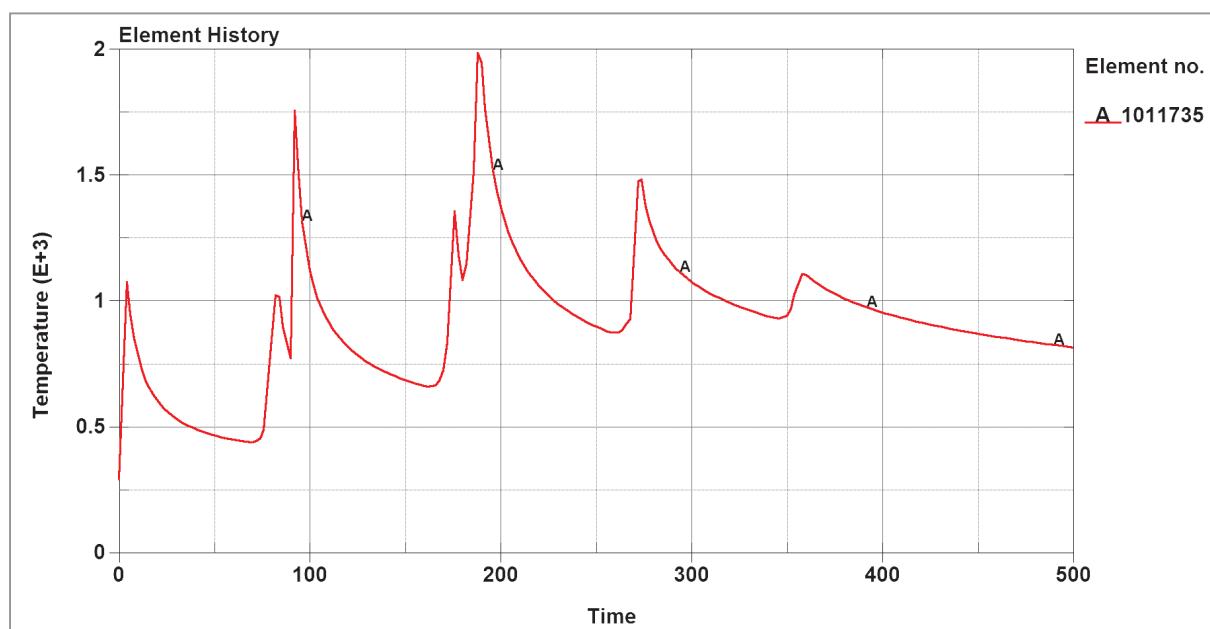


Рис. 6. Термический цикл при моделировании 4-проходной сварки стали

Влияние подогрева до сварки, фазовых превращений, а также до сварочной и постсварочной термической обработки на напряжения и деформации показаны на рис. 7–11.

Вариант 1. Сварка без подогрева

График изменения напряжений при сварке без подогрева показывает, что максимальные напряжения появляются при первом проходе и составляют 420 МПа, затем падают почти до 20 МПа в момент максимальной температуры при втором проходе. Это происходит, по-видимому, из-за того, что при температуре 1750 °С предел текучести стали стремится к нулю и напряжения релаксируют за счет пластической деформации. Это наблюдается до четвертого прохода, температура контрольного элемента при котором составляет 1500 °С, когда напряжения частично релаксируют, а далее наблюдается рост напряжений до значения 320 МПа. Значения деформаций растут со временем, проходя через пики, соответствующие максимумам температур при соответствующих проходах. Тренд деформаций нарастает до 0,51 мм и останавливается на значении 0,45 мм. Данная деформация – это результирующая по трем координатам.

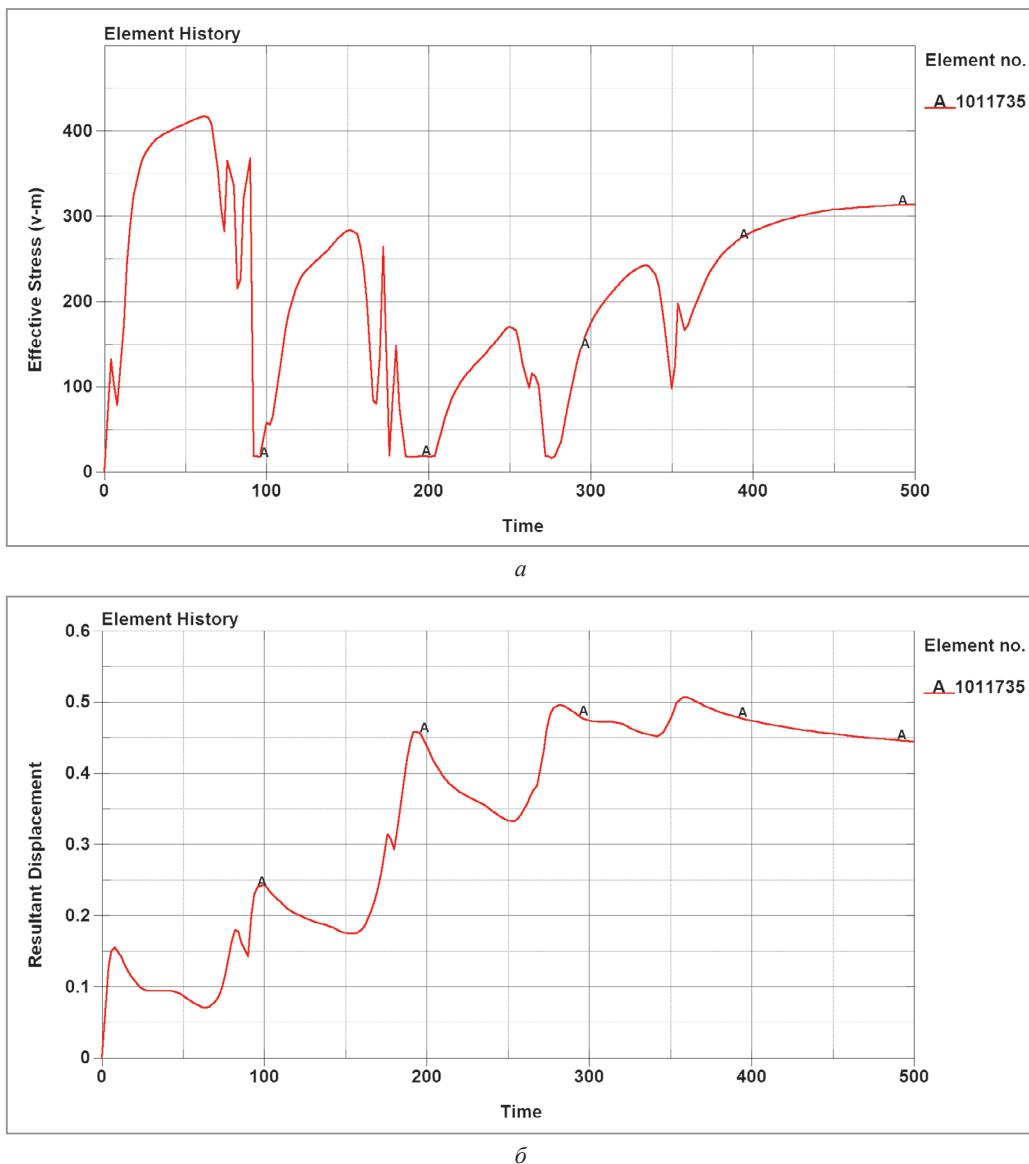


Рис. 7. Изменения напряжений по фон Мизесу (а) и деформаций (б) во времени контрольного элемента 1011735 при моделировании сварки без подогрева

Вариант 2. Сварка с подогревом при 270 °C

График изменения напряжений при сварке с подогревом показывает, что максимальные напряжения появляются при первом проходе и составляют 250 МПа, затем падают почти до 140 МПа, а потом опять возрастают до 230 МПа и снова падают до 20 МПа, затем возрастают до 190 МПа в момент максимальной температуры при втором проходе. При втором проходе появляются три цикла – увеличение напряжения и релаксация напряжений. Это происходит из-за снижения предела текучести при температуре 1750 °C до нулевых значений и напряжения снимаются в процессе второго прохода за счет пластической деформации. Данное явление происходит вплоть до конца третьего прохода, когда напряжения нивелируются почти до нулевых значений. После четвертого прохода напряжения после небольшого скачка монотонно растут и достигают значения 80 МПа. Значения деформаций растут со временем, а пики соответствуют максимумам температуры при соответствующих проходах. Тренд деформаций нарастает вплоть до 0,61 мм и останавливается на значении 0,5 мм.

Вариант 3. Сварка с подогревом 270 °C и предварительной нормализацией при 1050 °C

График изменения напряжений при сварке с подогревом 270 °C и предварительной нормализацией при 1050 °C показывает, что максимальные напряжения появляются при первом проходе и составляют 275 МПа, затем падают почти до 145 МПа, а потом опять возрастают до 230 МПа и снова падают до 20 МПа, затем возрастают до 190 МПа в момент максимальной температуры при втором проходе. При втором проходе появляются три цикла нагрузки и разгрузки. Это наблюдается вплоть до конца третьего

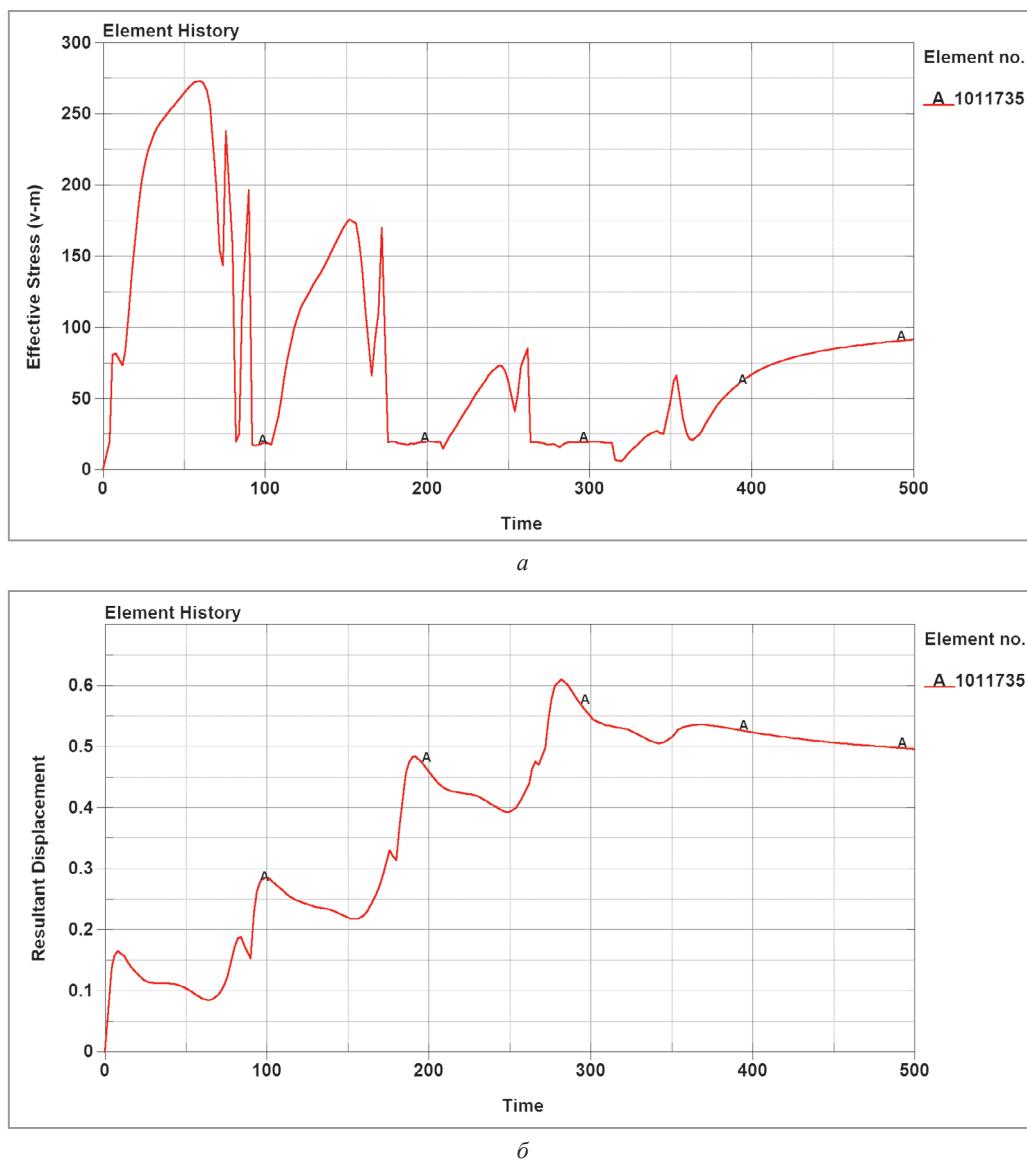


Рис. 8. Изменения напряжений по фон Мизесу (а) и деформаций (б) во времени контрольного элемента 1011735 при моделировании сварки с подогревом

прохода, когда напряжения нивелируются. После четвертого прохода напряжения монотонно растут, пройдя через небольшой пик, остаются при значении 60 МПа. Значения деформаций растут со временем, а пики соответствуют максимумам температуры при соответствующих проходах. Тренд деформаций нарастает и, пройдя через максимальное значение 0,58 мм, останавливается на значении 0,48 мм.

Вариант 4. Сварка с подогревом 270 °С, предварительной нормализацией при 1050 °С и фазовыми превращениями

График изменения напряжений при сварке с подогревом 270 °С, предварительной нормализацией при 1050 °С и фазовыми превращениями показывает, что максимальные напряжения появляются при первом проходе и составляют 275 МПа, затем падают почти до 145 МПа, а потом опять возрастают до 230 МПа и снова падают до 20 МПа, затем возрастают до 190 МПа в момент максимальной температуры при втором проходе. При втором проходе появляются три цикла нагрузки и разгрузки. Это наблюдается вплоть до конца третьего прохода, когда напряжения достигают минимальных значений 10–15 МПа. После четвертого прохода напряжения монотонно растут, пройдя через небольшой пик, и остаются при значении 60 МПа. Значения деформаций растут со временем, а пики соответствуют максимумам температуры при соответствующих проходах. Тренд деформаций нарастает и, пройдя через максимальное значение 0,58 мм, останавливается на значении 0,48 мм.

Вариант 5. Сварка с подогревом 270 °С, предварительной нормализацией при 1050 °С, фазовыми превращениями и постсварочной нормализацией при 1050 °С

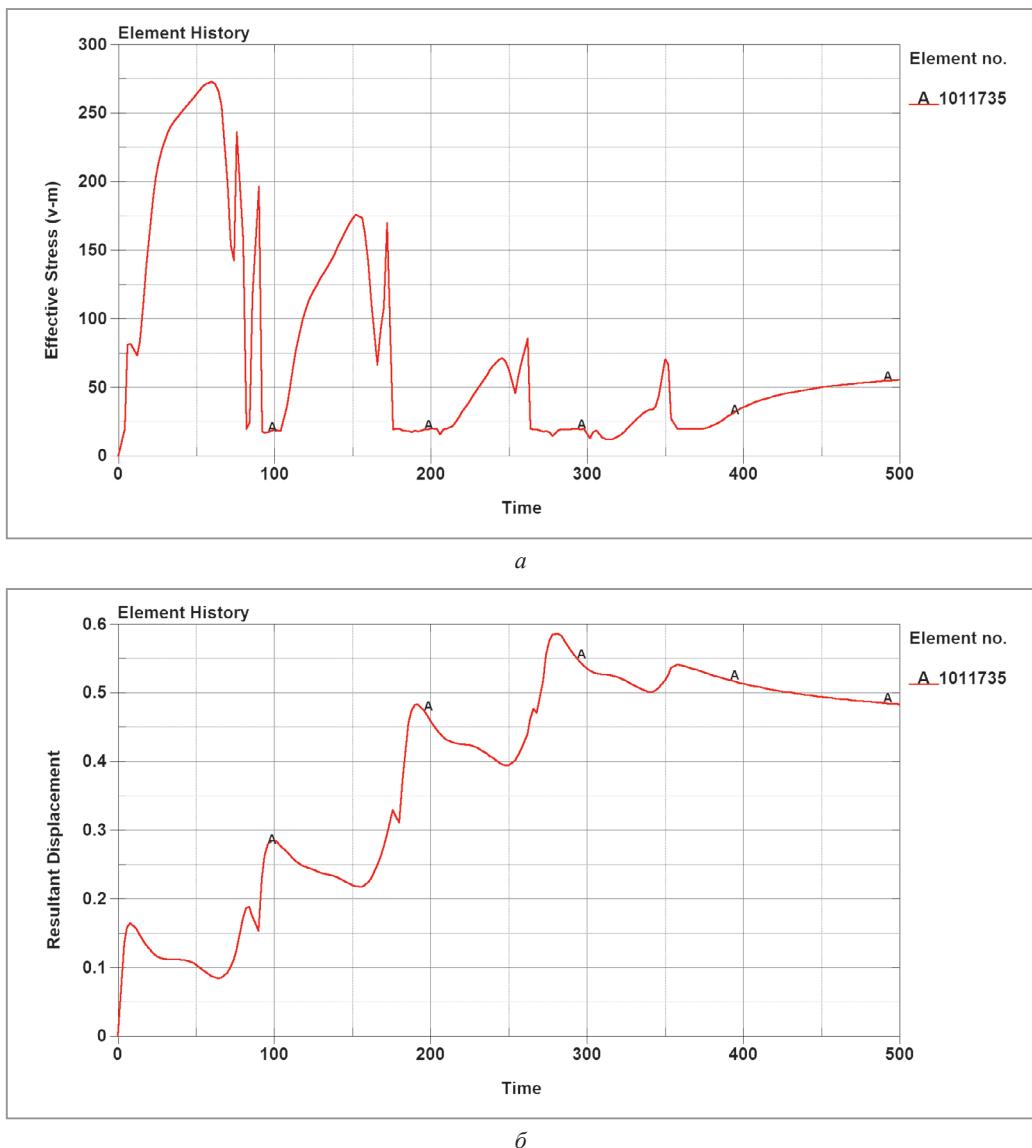


Рис. 9. Изменения напряжений по фон Мизесу (а) и деформаций (б)

во времени контрольного элемента 1011735 при моделировании сварки с подогревом и предварительной нормализацией

График изменения напряжений при сварке с подогревом 270 °С, предварительной нормализацией при 1050 °С, фазовыми превращениями и постсварочной нормализацией показывает, что напряжения проходят через пять максимумов при значении 20 МПа, затем падают почти до 3,5 МПа, а потом опять возрастают до 20 МПа и снова падают до 4 МПа, затем опять возрастают до 20 МПа в момент максимальной температуры при третьем проходе. Это наблюдается вплоть до конца четвертого прохода, далее, пройдя через минимум при значении 5 МПа и на 370 с, выходят на плато при значении 17,5 МПа. Значения деформаций, подскочив от 0 до 1,44 мм при первом проходе, остаются неизменными весь период сварки.

В табл. 3 приведены значения остаточных и максимальных напряжений и деформаций в зависимости от вида расчетного варианта. Очевидно, что вариант без подогрева имеет самые высокие максимальные (420 МПа) и остаточные (320 МПа) напряжения, однако остаточная (0,45 мм) и максимальная (0,51 мм) деформация в данном варианте минимальна по сравнению с другими. При наличии подогрева 270 °С (вариант 2) резко снижаются максимальные (275 МПа) и остаточные (80 МПа) напряжения по сравнению с вариантом 1 без подогрева.

Сварка с подогревом 270 °С и предварительной нормализацией 1050 °С (вариант 3) и сварка с подогревом 270 °С, предварительной нормализацией 1050 °С и фазовыми превращениями (вариант 4) показывает одинаковые результаты по максимальным (275 МПа) и остаточным напряжениям (60 МПа), а также по максимальной (0,58 мм) и остаточной деформации (0,48 мм).

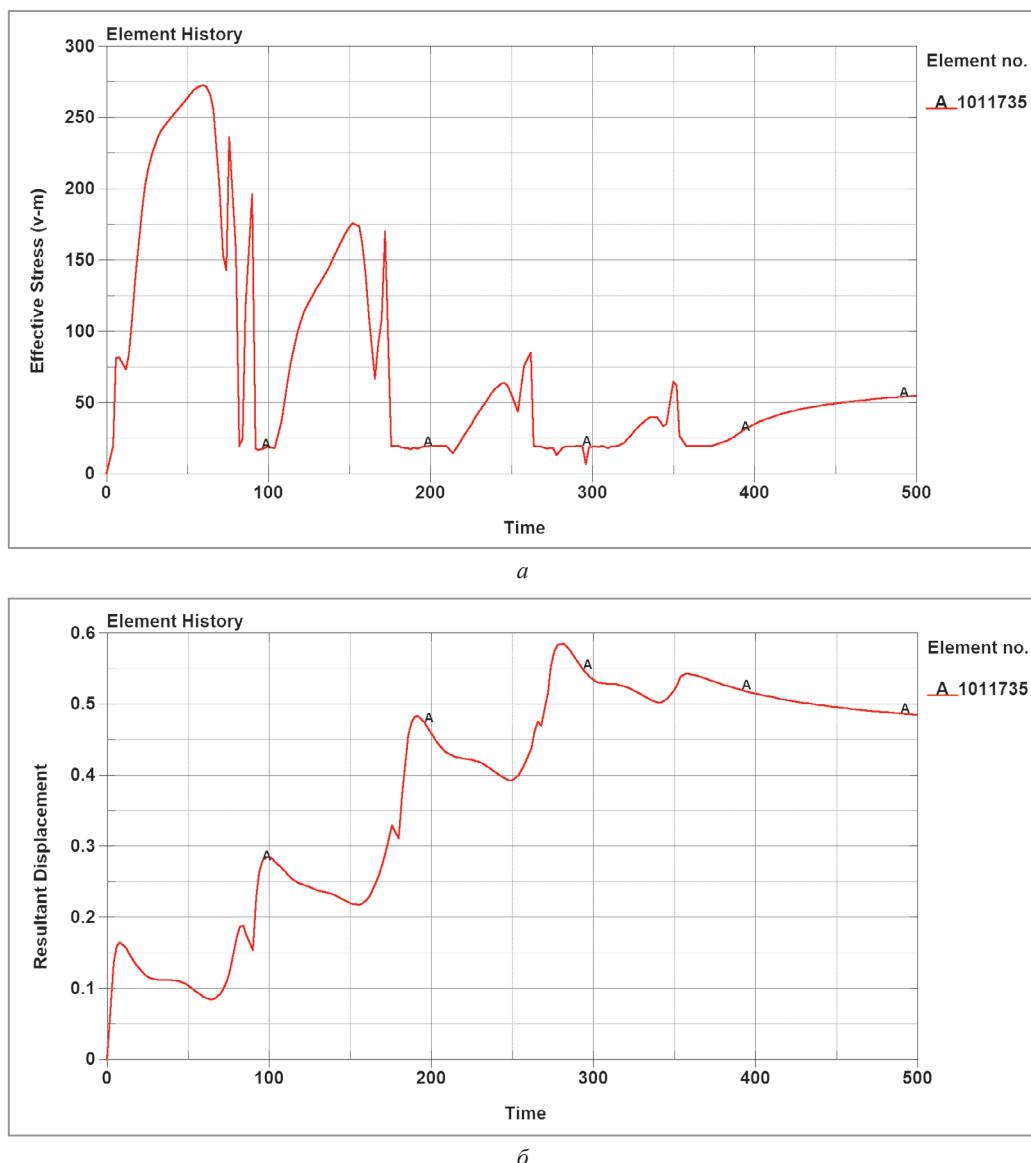


Рис. 10. Изменения напряжений по фон Мизесу (а) и деформаций (б) во времени контрольного элемента 1011735 при моделировании сварки с подогревом, предварительной нормализацией и фазовыми превращениями

Таблица 3. Значения остаточных и максимальных напряжений и деформаций в зависимости от вида расчетного варианта

Номер варианта	Наименование варианта	Остаточные напряжения, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Остаточная деформация, мм	Максимальная деформация, мм
1	Сварка без подогрева	320	420	0,45	0,51
2	Сварка с подогревом	80	275	0,5	0,61
3	Сварка с подогревом 270 °C и предварительной нормализацией 1050 °C	60	275	0,48	0,58
4	Сварка с подогревом 270 °C, предварительной нормализацией 1050 °C и фазовыми превращениями	60	275	0,48	0,58
5	Сварка с подогревом 270 °C, предварительной нормализацией 1050 °C, фазовыми превращениями и постсварочной нормализацией 1050 °C	17,5	20	1,44	1,44

Минимальные значения остаточных (17,5 МПа) и максимальные (20 МПа) значения напряжений получены для расчетного варианта 5 (сварка с подогревом 270 °C, предварительной нормализацией 1050 °C, фазовыми превращениями и постсварочной нормализацией 1050 °C), при этом получены максимальные значения деформации (1,44 мм).

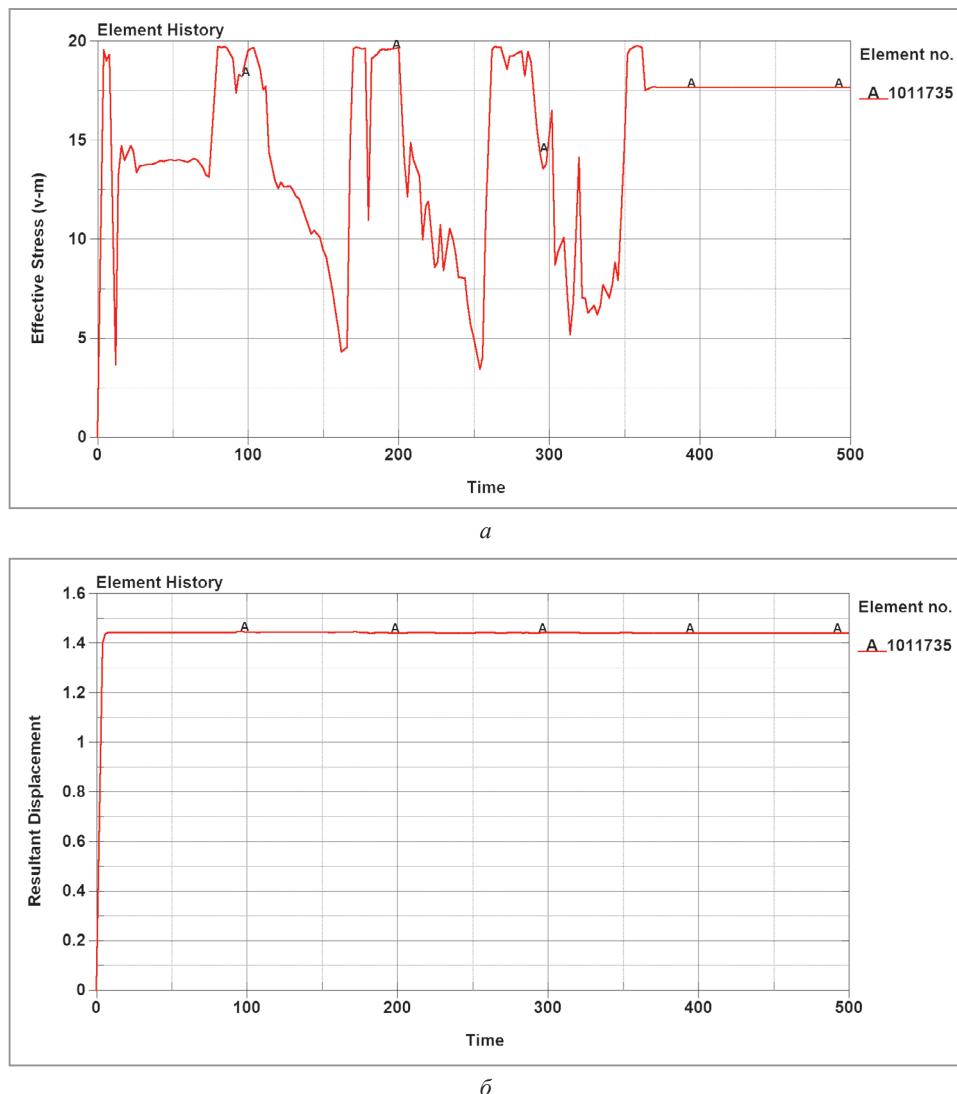


Рис. 11. Изменения напряжений по фон Мизесу (а) и деформаций (б) во времени контрольного элемента 1011735 при моделировании сварки с подогревом, предварительной нормализацией, фазовыми превращениями и постсварочной нормализацией

Выводы

Предварительный подогрев до 270 °С снижает максимальные напряжения с 420 до 275 МПа и остаточные напряжения с 320 до 80 МПа по сравнению с вариантом без подогрева.

Использование до сварочной нормализации снижает остаточные напряжения (вариант 3).

Введение в расчет дополнительной опции – фазовых превращений (вариант 4) по сравнению с вариантом 3 (сварка с подогревом 270 °С и предварительной нормализацией 1050 °С) не влияет на значения напряжений и деформаций.

Применение постсварочной нормализации (вариант 5) снижает максимальные (20 МПа) и остаточные (17,5 МПа) напряжения, однако создает максимальную деформацию 1,44 мм.

Минимальная остаточная деформация (0,45 мм) получена на варианте 1 (сварка без подогрева).

ЛИТЕРАТУРА

1. Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures / C. Hurtado- Noreña, C. A. Danón, M. I. Loppo, P. Bruzzoni // International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM-CONAMET. – 2013. – Р. 143–146.
2. Хромченко, Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
3. Пантелеенко, Ф. И. Влияние режимов предварительной термической обработки на структуру и механические свойства сварных соединений из стали P91 / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Зеленин, А. Л. Миньков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. Минск: Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, 2024. – Кн. 2. – С. 48–63.

4. **Филиппов, М. Н.** Моделирование распределения температуры при TIG сварке трубы из стали Р91 для определения размера хрупкого участка ЗТВ после каждого прохода / М. Н. Филиппов, А. Л. Миньков // Междунар. молодежная науч. конф. «XXVII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», посвященная 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. – 2025. – № 1. – С. 1–6.
5. **Yang, K.** Elastoplastic fracture analysis of the P91 steel welded joint under repair welding thermal shock based on XFEM / K. Yang, Y. Zhang, J. Zhao // Metals. – № 10. – Р. 1285.
6. **Кархин, В. А.** Тепловые процессы при сварке / В. А. Кархин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с.
7. **Goldak, J. A.** Computational Welding Mechanics, Springer Science+Business Media / J. A. Goldak // Inc. USA, 2005. – P. 325.

REFERENCES

1. **Hurtado- Noreña C., Danón C.A., Lupo M.I., Bruzzoni P.** Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures. *International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials*, SAM–CONAMET, 2013, pp. 143–146.
2. **Khromchenko F.A.** *Resurs svarnyh soedinenij paroprovodov* [Resource of Welded Joints of Steam Pipelines]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 2002, 352 p.
3. **Panteleenko F.I., Zelenin V.A., Minkov A.L.** Vlijanie rezhimov predvaritel'noj termicheskoy obrabotki na strukturu i mehanicheskie svojstva svarnyh soedinenij iz stali R91 [The Influence of Preliminary Heat Treatment Regimes on the Structure and Mechanical Properties of Welded Joints Made of P91 Steel]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. Kn. 2 = Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials Collection of Scientific Papers. Book 2*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, pp.48–63.
4. **Filippov M.N., Minkov A.L.** Modelirovanie raspredelenija temperatury pri TIG svarke truby iz stali R91 dlja opredelenija razmera hrupkogo uchastka ZTV posle kazhdogo prohoda [Modeling of temperature distribution during TIG welding of a pipe made of steel P91 to determine the size of the brittle zone after each pass]. *Mezhdunarodnaja molodezhnaja nauchnaja konferencija «XXVII Tupolevskie chtenija (shkola molodyh uchenyh)», posvjashchennoj 80-letiju Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne = International Youth Scientific Conference “XXVII Tupolev Readings (School of Young Scientists), dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War*, 2025, no. 1, pp. 1–6.
5. **Yang, K.; Zhang, Y.; Zhao, J.** Elastoplastic fracture analysis of the P91 steel welded joint under repair welding thermal shock based on XFEM. Metals 2020, 10, 1285 p.
6. **Karhin V.A.** *Teplovye processy pri svarke* [Thermal processes in welding]. St.- Petersburg, Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, 572 p.
7. **Goldak, J.A.** Computational Welding Mechanics, Springer Science+Business Media, Inc. USA, 2005, P. 325.