

УДК 621.791:658.588

А.С. Миленин, канд. техн. наук
Е.А. Великоиваненко, канд. физ.-мат. наук
Г.Ф. Розынка, науч. сотр.
Н.И. Пивторак, науч. сотр.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СВАРОЧНОЙ НАПЛАВКЕ ДЕФЕКТА УТОНЧЕНИЯ

О.С. Міленін, канд. техн. наук
О.А. Великоіваненко, канд. фіз.-мат. наук
Г.П. Розинка, наук. співроб.
Н.І. Півторак, наук. співроб.

Институт електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВІДНОГО ЕЛЕМЕНТУ ПРИ ЗВАРЮВАЛЬНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ДЕФЕКТУ СТОНШЕННЯ

Aleksey Milenin, PhD in Technical Sciences
Yelena Velikoivanenko, PhD in Physical and Mathematical Sciences
Galina Rozynka, researcher
Nina Pivtorak, researcher

Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF PIPELINE ELEMENT LIMIT STATE AT WELDING SURFACING OF LOCAL THINNING DEFECT

На основе современных представлений о зарождении и развитии разрушения материалов при сварке разработан комплекс математических моделей сварочной наплавки дефектов локальной потери металла в рамках ремонтно-восстановительных работ на магистральных трубопроводах под давлением. На примере наплавки типичного дефекта утончения стенки трубопровода продемонстрировано влияние основных параметров ремонта на технологическую прочность конструкционного элемента и эффективность восстановления его несущей способности.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, ремонт без вывода из эксплуатации, наплавка дефекта утончения, оптимизация, математическое моделирование.

На основі сучасних уявлень про зародження та розвиток руйнування матеріалів під час зварювання розроблено комплекс математичних моделей зварювального наплавлення дефектів локальної втрати металу в межах ремонтно-відновлювальних робіт на магистральних трубопроводах під тиском. На прикладі наплавлення типового дефекту стоншення стінки трубопроводу продемонстровано вплив основних параметрів ремонту на технологічну міцність конструкційного елемента та ефективність відновлення його несучої здатності.

Ключові слова: магистральний трубопровід, ремонт без виведення з експлуатації, наплавлення дефекту стоншення, оптимізація, математичне моделювання.

On the basis of up-to-date conceptions of nucleation and development of material fracture at welding the complex of mathematical models of deposit welding of local metal loss within the limits of repair operations on pressurized main pipelines, has been developed. Exemplified with deposit welding of typical pipeline wall thinning defect, the influence of main repair parameters on the construction unit technological strength and effectiveness of its bearing capacity renewal, has been shown.

Key words: main pipeline, in-service repair, deposit welding of local metal loss, optimization, mathematical modeling.

Введение. Обеспечение бесперебойной работы магистральных трубопроводов (МТ) сопряжено с необходимостью регулярного проведения процедур технической диагностики фактического состояния конструкций и соответствующих ремонтно-восстановительных работ. В частности, одним из самых распространённых эксплуатационных повреждений МТ являются дефекты локальной потери металла, которые при существенном развитии коррозионных процессов могут вызвать значительное снижение несущей способности конструкции. Использование для устранения такого рода дефектов сварочной наплавки позволяет производить ремонт МТ без вывода его из эксплуатации, что, наряду с экономическими и экологическими преимуществами, имеет характерные сложности. К последним следует отнести необходимость гарантирования высокого уровня безопасности проведения сварочных работ, что препятствует широкому внедрению такого рода технологических подходов в комплексе процедур поддержания работоспособности МТ.

Среди существующих критериев оптимизации сварочных процессов при наплавке дефектов МТ под давлением можно выделить два основных подхода: обеспечение прогрева внутренней поверхности трубы не выше критической температуры $T_k=720\text{--}980\text{ }^\circ\text{C}$ и гарантирование отсутствия существенного избыточного выпучивания стенки в процессе локального нагрева $dr_k < 1$ мм [1]. Оба эти подхода являются достаточно консервативными, но не учитывают ряд важных параметров ремонта, требующих оптимизации и позволяющих максимально эффективно использовать преимущества ремонта МТ без вывода из эксплуатации. В рамках настоящей работы на основе современных методов математического моделирования реализованы подходы численного анализа предельного состояния трубопроводного элемента под внутренним давлением в процессе многопроходной наплавки трёхмерного поверхностного дефекта, а также предложены критерии для оптимизации параметров этого технологического процесса.

Математическая модель процесса сварочной наплавки поверхностного дефекта утончения стенки трубопровода. Для учёта специфики процессов, определяющих безопасность проведения сварочных работ при наплавке дефекта утончения на поверхности трубопровода, находящегося под внутренним давлением, необходима реализация комплекса математических моделей, позволяющих описать кинетику температурного, напряжённо-деформированного и повреждённого состояния металла конструкции. Ключевым аспектом такого численного исследования является анализ формирования предельного состояния материала конструкции согласно обоснованным критериям для оптимизации технологических параметров ремонтных работ.

Моделирование сварочной наплавки производилось путём совместного решения пространственной задачи теплопроводности и краевой задачи нестационарной термопластичности, которое позволяет проследить кинетику температурного поля при сварочном нагреве и развитие упруго-пластических деформаций с момента начала наплавки вплоть до остаточного состояния после полного остывания конструкции [2]. При высоких температурах и в отсутствие острых геометрических концентраторов основным механизмом зарождения несплошности материала конструкции является вязкое разрушение, которое заключается в зарождении и развитии микропор материала при интенсивном пластическом течении и последующем формировании макродефектов. Изменение несущего нетто-сечения металла при внешних нагрузках, близких к предельным, необходимо дополнительно учитывать при формулировке задачи нестационарной термопластичности, что в настоящей работе было реализовано посредством использования критерия текучести согласно модели Гурсона-Твергаарда-Нидлмана [3] и дополнительным компонентом в суммарных расчётных деформациях [4]:

$$\begin{cases} \Psi = \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \cdot \sqrt{1 + (q_3 \cdot f^*)^2 - 2 \cdot q_1 \cdot f^* \cdot \cosh\left(q_2 \cdot \frac{3 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T}\right)}, \\ \Psi > \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s \end{cases}$$

где Ψ – функция состояния материала, определяемая итерированием для удовлетворения условия пластического течения; G – модуль сдвига; σ_i – интенсивность напряжений; σ_m – мембранные напряжения; f^* – эквивалентная объёмная концентрация пор вязкого разрушения с учётом их взаимодействия [3].

Условие зарождения пор вязкого разрушения объёмной концентрации f в неизотермическом случае с учётом химической неоднородности конструкционного материала может быть сформулировано, исходя из формулы Франклина и критического значения параметра Одквиста k , следующим образом [4]:

$$f = \begin{cases} 0 \text{ при } \chi_k = \int \frac{d\kappa}{\kappa_c(T)} < \alpha_{AK}, \\ 0,054 \cdot \left([S]\% - \frac{0,001}{[Mn]\%} \right) \text{ при } \chi_k \geq \alpha_{AK}, \end{cases}$$

где $\kappa_c(T) \rightarrow \kappa_{c0} \cdot \exp\left\{\left[\frac{\sigma_T - \sigma_T(T)}{B}\right]^\beta\right\}$ – критическое значение параметра Одкависта;

σ_T – предел текучести металла; [S]%, [Mn]% – процентное содержание серы и марганца в стали, соответственно; $\alpha_{AK}=0,0 \div 1,0$ – коэффициент, характеризующий относительное снижение прочности металла в области поверхности контакта неметаллических включений с металлической матрицей; T – температура в рассматриваемой области конструкции; κ_{c0} , B , β – константы.

Рост пор вязкого разрушения при пластическом деформировании металла количественно описывается законом Райса-Трейси [5]:

$$df = f \cdot K_1 \cdot \exp\left(K_2 \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p,$$

где ε_i^p – интенсивность пластических деформаций; K_1 , K_2 – константы.

Таким образом, условие нарушения целостности стенки МТ при сварочной наплавке по механизму пластической неустойчивости несплошного материала может быть математически выражено следующим образом [4]:

$$\left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)_{KP} \geq \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1,5 \cdot \sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1,5 \cdot \sigma_s(\kappa, T)}, \quad (1)$$

где κ^* – параметр Одкависта на предыдущем шаге прослеживания деформаций; ε_f – предельная деформация металла [3].

Кроме того, значительное развитие пористости материала по вязкому механизму вызывает существенное увеличение истинных напряжений в металле конструкции и, как результат, её разрушение; поэтому с целью формулировки удобного для численного анализа критерия может быть добавлено дополнительное к (1) следующее условие недопустимого состояния металла:

$$1 + (q_3 \cdot f^*)^2 - 2 \cdot q_1 \cdot f^* \cdot \cosh\left(q_2 \cdot \frac{3 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T}\right) \rightarrow 0. \quad (2)$$

Использование численного критерия (1)–(2) в рамках конечно-элементного решения совместной задачи неизотермической термопластичности и развития вязкого разрушения позволяет прогнозировать появление участков конструкции с недопустимой склонностью к пластической неустойчивости. Кроме того, дополнительно необходимо учитывать тот факт, что в области дефекта утончения после его устранения посредством сварочной наплавки при режимах с существенным тепловложением, в результате избыточного радиального деформирования трубы dr_{max} может сформироваться дефект формы, снижающий прочность трубопровода.

Результаты и обсуждение. Использование данного подхода позволяет оценить влияние на технологическую прочность МТ при наплавке дефекта таких параметров, как мощность сварочного источника, внутреннее давление при ремонте P_r , минимальная температура остывания металла после наложения валиков T_{min} . В качестве примера был рассмотрен типичный дефект коррозионного утончения $2s \cdot a = 70 \cdot 10$ мм на внешней

поверхности трубопровода $D \cdot t = 1420 \cdot 20$ мм (рис. 1, а) из стали 17Г1С с максимальным эксплуатационным давлением $P = 7$ МПа. Температура предварительного подогрева места наплавки для предотвращения появления холодных трещин $T_{np} = 100$ °С. Порядок наложения валиков приведен на рис. 1, б.

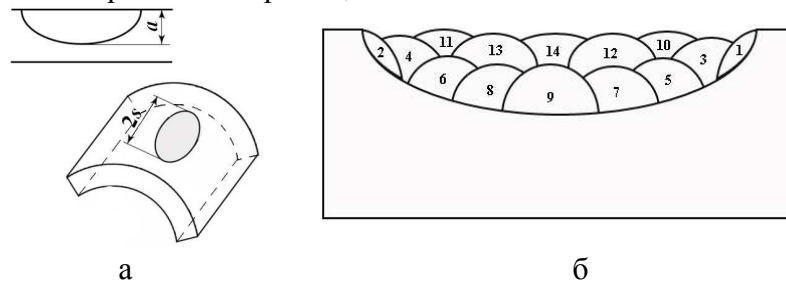


Рис. 1. Схема дефекта утончения стенки трубопровода (а) и порядок наложения валиков при сварочной наплавке (б)

Расчёт кинетики напряжённо-деформированного состояния конструкции в процессе сварочной многопроходной наплавки позволил проследить состояние конструкции вплоть до остаточного состояния. Распределение напряжений после ремонта в области наплавленного дефекта отличается существенной неоднородностью (рис. 2), что обусловлено, прежде всего, поэтапным ассиметричным изменением профиля конструкции при наложении каждого из валиков.

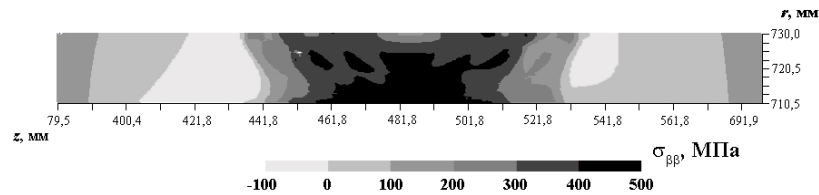


Рис. 2. Распределение остаточных тангенциальных напряжений $\sigma_{\phi\phi}$ в области дефекта утончения стенки магистрального трубопровода после сварочной наплавки

Оценка предельного состояния МТ при наплавке согласно разработанной методике показала меньшую консервативность в сравнении с существующими подходами. Так, соотношение между максимальным выпучиванием стенки dr_{max} и максимальной температурой внутренней поверхности $T_{max in}$ при наложении центрального валика (рис. 3, а) для допустимых согласно рекомендованным режимам сварочных токов I и внутренних давлений P_r удовлетворяет все критерии допустимости. Большая мощность сварочного нагрева и внутреннее давление вызывают недопустимый перегрев внутренней поверхности и избыточную деформацию стенки МТ (рис. 3, б), но при этом условие пластической неустойчивости (1)–(2) не выполняется. Это объясняется тем, что P_r не является параметром оптимизации согласно критерию оценки T_k , поэтому диапазон давлений выбран максимально консервативно.

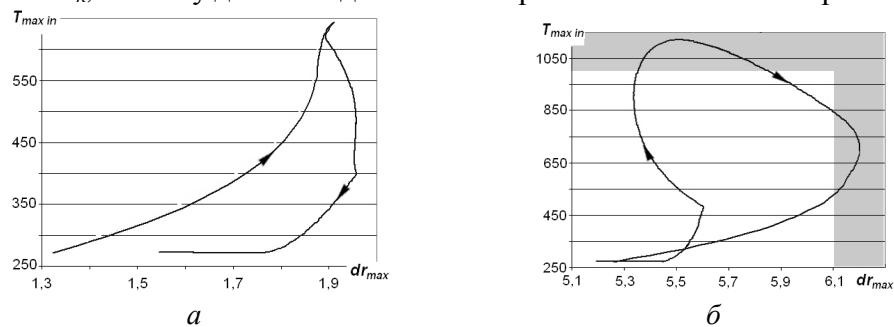


Рис. 3. Зависимости избыточного радиального перемещения стенки МТ dr_{max} от максимальной температуры внутренней поверхности $T_{max in}$ при наплавке валика на дефект утончения: (а) – $I = 100$ А, $P_r = 4$ МПа; (б) – $I = 150$ А, $P_r = 7$ МПа

Выполнение критерия (1)–(2) возможно при избыточном перегреве в области сварки, т. е. при чрезмерно высокой температуре T_{min} . Если петля деформаций в температурном цикле при наложении валиков недостаточна для значительного снижения деформаций выпучивания, это может вызвать либо снижение коэффициента запаса n прочности трубопровода в результате неблагоприятного остаточного деформированного состояния в области наплавки (дефекта формы), либо пластическую неустойчивость и разрушение стенки трубопровода в процессе ремонта (табл.).

Таблица

Влияние некоторых технологических параметров наплавки на предельное и остаточное состояния трубопровода

№ режима	P_r , МПа	I , А	Минимальная температура остывания T_{min} , °С	Снижение n в результате образования дефекта формы
1	4	100	300	$1-2,227/2,254=0,012$
2	4	100	500	$1-2,213/2,254=0,018$
3	7	100	300	$1-2,137/2,254=0,052$
4	7	150	300	$1-2,077/2,254=0,079$
5	7	150	500	разрушение

На рис. 4 приведена двухпараметрическая I - P -диаграмма предельного состояния участка МТ с рассматриваемым дефектом в зависимости от внутреннего давления в трубопроводе при ремонте и сварочного тока при наплавке рассматриваемого дефекта. Из этой диаграммы видно, что использование критерия (1)–(2) с учётом возможной недопустимости остаточного деформирования стенки трубы в области наплавки с позиции снижения её несущей способности является наиболее рациональным: при относительно небольшом тепловложении и значительном внутреннем давлении избыточное радиальное деформирование оказывает большее влияние на остаточное состояние конструкции в сравнении с процессами вязкого разрушения, тогда как при увеличении мощности источника нагрева пластическая неустойчивость металла конструкции является наиболее важным фактором, определяющим предельное состояние конструкции.

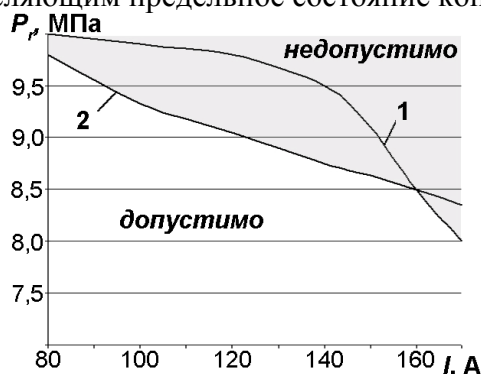


Рис. 4. I - P -диаграмма предельного состояния участка МТ при наплавке дефекта:
1 – по условию пластической неустойчивости; 2 – по остаточному состоянию

Выводы

1. Построены математические модели и комплекс средств компьютерного моделирования кинетики полей температур, деформаций, напряжений при многопроходной сварочной наплавке дефекта локального утончения стенки МТ при ремонте под давлением. Предложены критерии предельного состояния трубопровода при наплавке, основанные на условиях пластической неустойчивости металла и избыточном деформировании стенки трубы в условиях совместного температурно-силового воздействия на область дефекта.

2. Показано, что существующие критерии оптимизации ремонта МТ сварочной наплавкой объективно более консервативны в сравнении с предложенным подходом, т. к.

не рассматривают ряд важных технологических параметров, таких как внутреннее давление в трубопроводе при ремонте, степень остывания области дефекта в процессе многопроходной наплавки, параметры предельного состояния материала конструкции.

3. На примере типичного дефекта утончения стенки трубопровода продемонстрированы характерные особенности предельного состояния конструкции и технологические параметры, допустимые с точки зрения безопасности и качества ремонта наплавкой на МТ под давлением. Показано, что варьирование сварочного тока и внутреннего давления при наплавке изменяет характер предельного состояния, что является эффективным инструментом оптимизации ремонтно-восстановительных работ как с позиции безопасности сварки на действующем МТ, так и с точки зрения гарантирования необходимого остаточного ресурса трубопровода после ремонта.

Список использованных источников

1. *Kiefner J. F.* Pipeline repair manual / J. F. Kiefner, W. A. Bruce, D. R. Stephens. – Houston : Technical Toolboxes, Inc., 1994. – 167 p.
2. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К. : Наукова думка, 2006. – 618 с.
3. *Tvergaard V.* Material failure by void growth to coalescence / V. Tvergaard // *Advances in Applied Mechanics*. – 1990. – № 27. – P. 83–151.
4. *Моделирование* процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин, Н. И. Пивторак // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 9. – С. 26–31.
5. *Карзов Г. П.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.