

СТРУКТУРА, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.

**Л. И. Маркашова, д. т. н., В. Д. Позняков, д. т. н., А. А. Максименко м. н. с.,
Т. А. Алексеенко, м. н. с., Е. Н. Бердникова, к. т. н.**

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

Одним из основных требований, предъявляемых к металлическим конструкциям и их сварным соединениям при технологических разработках является обеспечение необходимых эксплуатационных свойств. Наиболее значимыми критериями при этом являются: высокий предел текучести, низкая температура перехода из вязкого в хрупкое состояние, высокая трещиностойкость и хорошая свариваемость, что обеспечивает получение надежных в эксплуатации сварных соединений [1-2]. При этом известно, что практически все эксплуатационные свойства металлов, сплавов и их соединений определяются комплексом структурно-фазовых параметров формирующихся в таких материалах при различных технологических термомеханических условиях (изготовления, термообработки, сварки и т. п.) [3]. Поэтому исследование и более детальное изучение взаимосвязи **технология ↔ структура ↔ свойства** является необходимым условием не только для определения наиболее оптимального структурного состояния, но и для корректировки технологических режимов сварки.

Однако кроме технологических процессов, связанных непосредственно с изготовлением новых изделий и конструкций в ряде случаев возникает необходимость в выполнении ремонтно-восстановительных работ. Это требует учета дополнительно возникающих условий характерных для ремонтной сварки. Прежде всего, это возможность формирования в соединениях значительных по величине (до $\approx 0,8\sigma_{0,2}$) остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$) в зоне сварки. Их величина зависит прежде всего от толщины ремонтируемых конструкций и жесткости закрепления свариваемых элементов. В связи с усложнениями технологических процессов при восстановительном ремонте соответственно повышаются и требования к структурному состоянию металла ремонтируемых сваркой конструкций.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы установить влияние сварочных напряжений на формирование структуры в сварных соединениях высокопрочных сталей ремонтируемых конструкций и определить оптимальное структурное состояние, обеспечивающее высокие эксплуатационные свойства изделиям.

В качестве объекта исследований выбраны наиболее часто используемые в практике стыковые соединения которые изготавливались из высокопрочной стали 17Х2М (с использованием проволоки марки Св-10ХН2ГСМФТЮ), обеспечивающие в соединении бейнито-мартенситные структуры. Сварка осуществлялась в закреплённом состоянии. Изменение базы закрепления образцов (ширины пластин - **б**) позволяло регулировать уровень остаточных

напряжений в исследуемых соединениях от $\sigma_{ост}=450$ МПа ($\approx 0,8\sigma_{0,2}$) при $b = 50$ мм до $\sigma_{ост}\approx 280$ МПа ($\approx 0,4\sigma_{0,2}$) при $b = 150$ мм.

Структурно-фазовые, концентрационные изменения, характер распределения и плотность дефектов кристаллической решетки в металле шва и по глубине ЗТВ изучали с использованием комплекса методов исследования, включая: оптическую металлографию, аналитическую растровую электронную микроскопию (СЭМ-515 фирмы «PHILIPS», Голландия) и просвечивающую микрофракционную электронную микроскопию (JEM - 200CX фирмы «JEOL», Япония). Комплексные экспериментальные исследования позволили не только получить информацию на различных структурных уровнях (от зёрненного до дислокационного), но и выполнить аналитические оценки конкретного (дифференцированного) вклада отдельных структурно-фазовых факторов и параметров (фазового состава, величины зерна, субзерна, плотности дислокаций и т.п.) в изменение общей (интегральной) величины механических характеристик – прочности (σ_T), трещиностойкости (K_{Ic}), а также локальных внутренних напряжений (τ_B), являющихся потенциальными источниками зарождения и распространения трещин в исследуемых структурных микро областях [4-8].

В результате исследования структуры: фазовых составляющих (бейнита верхнего и нижнего - B_B , B_H ; мартенсита – M ; феррита – Φ); размера зерен (D_3) и объемной доли этих фаз (V_D , %), формирующихся в швах и различных участках ЗТВ в процессе сварки, а также изменений микротвердости (HV) установлено следующее. Сопоставление структурных состояний сварных соединений в закреплённом состоянии (при переходе от $b = 150$ мм \rightarrow k $b = 50$ мм) показывает, при соотношении объемных долей (V_D , %) фазовых составляющих ($V_{B_B} \sim 20...30\%$; $V_{B_H} \sim 25\%$; $V_M \sim 35...45\%$ и $V_\Phi \sim 5...10\%$) наблюдается измельчение (в среднем $\sim 1,2...1,4$ раза) структуры металла шва и участка перегрева при возрастании микротвердости (HV) на $\sim 15\%$, рис.1.

Детальные электронно-микроскопические исследования тонкой структуры на просвет, дающие представления о типе формирующихся структур и изменении плотности дислокаций (ρ) в различных структурных составляющих показали следующее. Равномерное распределение дислокаций (в объемах зерен B_B , B_H , $M_{отп}$ и вдоль их границ) при сравнительно невысокой их плотности $\rho \sim (4...7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ характерно для структуры металла шва с базой закрепления $b = 150$ мм. При переходе от шва к ЗТВ плотность дислокаций в объемах зерен несколько уменьшается до $\rho \sim (4...6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис.2а, в). Однако вдоль протяженных границ B_B (рис.2в) образуются дислокационные скопления, значения ρ в этих зонах достигают порядка $\sim 9 \times 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом также характерно укрупнение (в среднем в 2 раза) субструктурных элементов (реек B_B , B_H , $M_{отп}$).

При уменьшении базы закрепления (от $b = 150$ мм \rightarrow до $b = 50$ мм) установлено измельчение структурных элементов (рис.2б, г): для металла шва \sim на $5...7\%$ и ЗТВ (I зона) \sim на $5...20\%$ при увеличении плотности дислокаций ρ до $\sim 8 \times 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и равномерном ее распределении.

Таким образом, установлено, что при уменьшении базы закрепления (от b

=150мм → до b=50мм), бейнито-мартенситная структура, формирующаяся как со стороны металла шва, так и со стороны стали 17Х2М (I зона ЗТВ) характеризуется дисперсностью по размерам структурных составляющих (B_b , B_n , $M_{отп}$) при относительно равномерном распределении плотности дислокаций, что, по-видимому, должно способствовать равномерному уровню свойств прочности и пластичности, по зоне сварки.

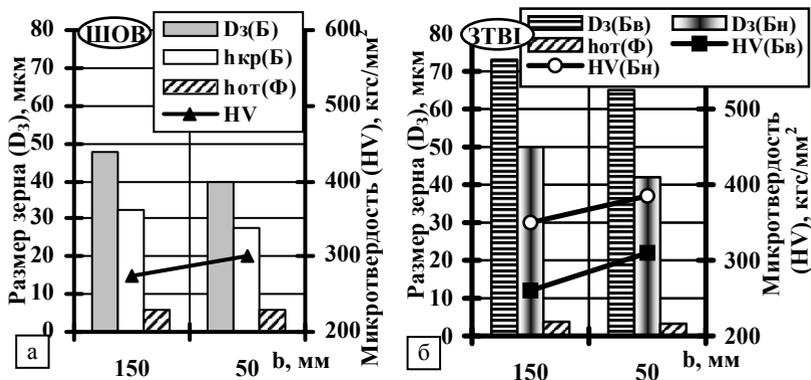


Рис. 1. Изменение структурных параметров (D_3 , HV, $h_{от}$) в металле шва (а) и участке перегрева (I ЗТВ) (б) сварных соединений стали 17Х2М при различных базах (b) закрепления (150 мм и 50 мм).

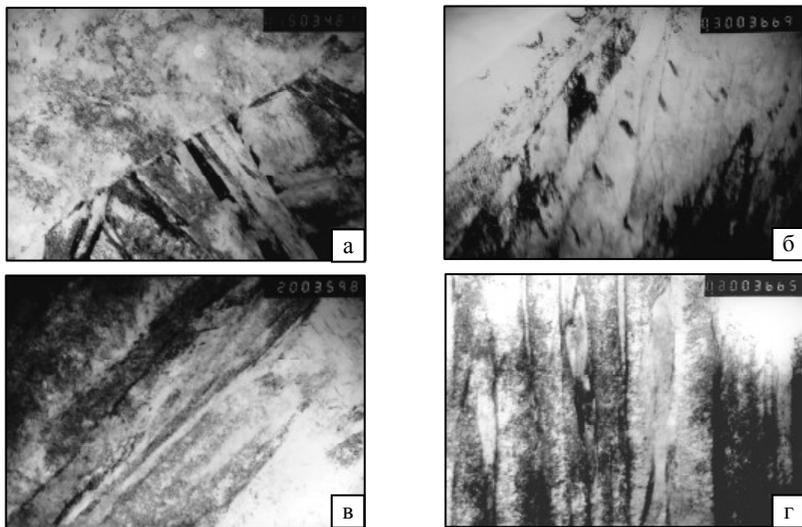


Рис. 2. Тонкая структура B_n (а, $\times 15000$; б, $\times 3000$) и B_b (в, г, $\times 20000$) в участке крупного зерна ЗТВ стали 17Х2М при базах: b=150мм (а,в); b=50мм (б,г).

Экспериментальная база данных (оптическая, аналитическая растровая, просвечивающая электронная микроскопия) позволила оценить дифференцированный вклад каждого из структурных параметров в изменение прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$) исследуемых сварных соединений, рис.3. При этом принималось, что общее (интегральное) значение $\Sigma\sigma_{0,2}$, согласно зависимости Арчарда, является суммарной величиной, состоящей из ряда составляющих [9-18]: σ_0 – сопротивления решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки или напряжение Пайерлса – Набарро); $\Delta\sigma_{т.р.}$ – упрочнения твердого раствора легирующими элементами и примесями (твердорастворное упрочнение); $\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_c$ – упрочнения за счёт изменения величины зерна и субзерна, согласно зависимости Холла – Петча (зернограничное и субструктурное упрочнение); $\Delta\sigma_d$ – дислокационного упрочнения, обусловленного междислокационным взаимодействием; $\Delta\sigma_{д.у.}$ – упрочнения за счёт дисперсных частиц по Оровану (дисперсионное упрочнение).

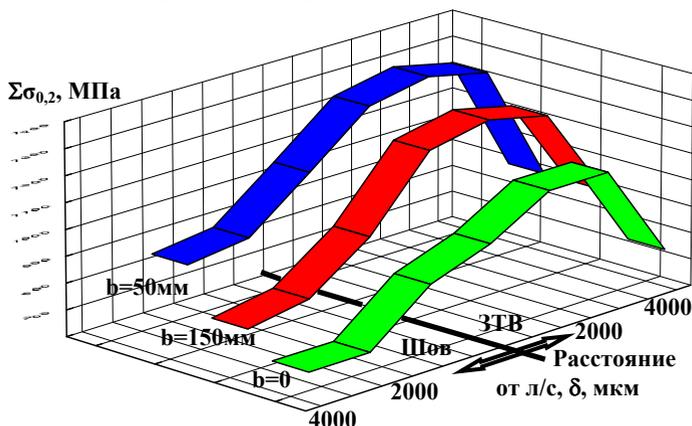


Рис. 3. Интегральное ($\Sigma\sigma_{0,2}$) изменение прочностных свойств сварных соединений стали 17Х2М по глубине (δ) от линии соединения (л/с): в исходном состоянии ($b=0$) и с различными базами (b) закрепления образцов.

Сравнение показателей предела текучести сварных соединений, полученные аналитическим способом, и анализ вклада в упрочнение металла различных параметров структуры показывает, что при сварке в жестком контуре с базами закрепления ($b=150$ мм и $b=50$ мм) общее (интегральное) упрочнение ($\Sigma\sigma_{0,2}$) в металле швов связано с влиянием субструктуры бейнитных фаз ($\Delta\sigma_c \sim 300$ МПа) и плотности дислокаций ($\Delta\sigma_d \sim 200...240$ МПа). При этом, общий уровень $\sigma_{0,2}$ при увеличении жесткости закрепления в среднем повышается \sim на 17% (по сравнению с $b=150$ мм) и \sim на 30% (по сравнению с исходным состоянием), что связано с возрастанием в основном вклада субзеренного ($\Delta\sigma_c$) упрочнения в структурах Б_Н ($\Delta\sigma_c \sim 162$ МПа) и дислокационного упрочнения

$M_{отп} (\Delta\sigma_d \sim 140 \text{ МПа})$.

Что касается металла ЗТВ, то в I - зоне (участке перегрева) упрочнение возрастает (по сравнению со швом) для обоих типов жесткости закрепления ~ в 1,3 раза ($\Delta\sigma_c \sim 490 \text{ МПа}$), что связано с возрастанием доли бейнитной (особенно B_H) составляющей.

Кроме того, показано, что при повышении прочностных характеристик с увеличением жесткости закрепления ($b= 50 \text{ мм}$), а следовательно уровня остаточных напряжений в сварных соединениях, значение параметра вязкости разрушения (K_{IC}) практически не меняется, что свидетельствует о хорошем сочетании прочностных пластических характеристик металла шва. При этом характер структур (мелкозернистые структуры при сравнительно равномерном повышении общей дислокационной плотности), формирующихся в металле сварных соединений характеризуется отсутствием протяженных градиентных зон (границ B_B) по плотности дислокаций (ρ), а соответственно и градиентов внутренних напряжений ($\Delta\tau_{вн}$). Величина такого типа напряжений порядка $\tau_{вн} \sim 4800 \dots 6500 \text{ МПа}$, что от уровня теоретической прочности ($\tau_{теор}$) составляет $\sim (0,6 \dots 0,8) \tau_{теор}$.

Таким образом, анализ взаимосвязи **технология** \Leftrightarrow **структура** \Leftrightarrow **свойства** показал, что при ремонтно-восстановительных работах наилучшие эксплуатационные свойства обеспечиваются даже в условиях высоких остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$). Связано это с формированием в металле шва и ЗТВ таких соединений оптимального структурного состояния.

Использованная литература.

1. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Макаров Э.Л. - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.
2. Риск образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей / В.И. Махненко, В.Д. Позняков, Е.А. Великоиваненко и др. // Автоматическая сварка.- 2009.- № 12. - С.5-10.
3. Dahl W. Prufung dez Schweiseseigung und Zahigkeit von Druckhalterstahlen // Der Stahlbau. 1974. v 43. №6. s. 190.191.
4. Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А. Влияние термических циклов сварки и внешнего нагружения на структурно-фазовые изменения и свойства соединений стали 17Х2М // Автомат. сварка. – 2009. - №7. – С. 21-29.
5. Маркашова Л.И., Позняков В.Д., Алексеенко Т.А., Бердникова Е.Н., Жданов С.Л., Кушнарева О.С., Максименко А.А. Влияние легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М // Автомат. сварка. – 2011. - №4. – С. 7-15.

6. *Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Арсенюк В.В., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А.* Структурный подход к оценке механических свойств в ЗТВ соединений сталей и сплавов // Сборник Междунар. конференции. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах (13-17сент. 2004г., пос. Кацивели, Крым, Украина). – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2004. – С.174 – 179.

7. *Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А.* Структурные факторы, определяющие свойства прочности, пластичности и разрушение сварных соединений // Сборник Междунар. конференции. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах (27-30 мая 2008г., пос. Кацивели, Крым, Украина). – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2009. – С.87-94..

8. *Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А.* Структурный критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений // Збірник праць IV Міжнародної конференції Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій (червень 2009, Львів). - Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів-2009, –С.447-451.

9. *Сузуки Х.* О пределе текучести поликристаллических металлов и сплавов // Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1967. – С. 255 – 260.

10. *Эшби И. Ф.* О напряжении Орована // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1972. – С. 88 – 107.

11. *Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 307 с.

12. *Конрад Г.* Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряжение течения металлов // Сверхмелкое зерно в металлах / Под ред. Л.К.Гордиенк., – М.: Металлургия, 1973. – С. 206 – 219.

13. *Армстронг Р. В.* Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном // Сверхмелкое зерно в металлах. - М.: Металлургия, 1973. – С. 11 – 40.

14. *Petch N. J.* The cleavage strength of polycrystalline // J. Iron and Steel Inst. – 1953. – 173, № 1. – P. 25 – 28.

15. *Orowan E.* Dislocation in Metals. – New York :AIME, 1954. – 103 p.

16. *Ashby M. F.* Mechanisms of deformation and fracture // Adv. Appl. Mech. – 1983. – 23. – P. 118 – 177.

17. *Келли А., Николсон Р.* Дисперсное твердение. – М.: Металлургия, 1966. – 187.

18. *Ebelling R., Ashby M. F.* Yielding and flow of two phase copper alloys // Phil. Mag. – 1966. – 13, № 7. – P. 805 – 809.