

Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева, М.Н. Игнатов

Пермский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ НА КИНЕТИКУ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрено влияние таких параметров сварки, как сила тока, скорость сварки и температура предварительного подогрева при полуавтоматической электродуговой сварке в среде углекислого газа, на кинетику изменения размеров неметаллических включений в зоне термического влияния стали 16Г2АФ. Составлена матрица планирования эксперимента, получены уравнения регрессии, позволяющие моделировать влияние параметров режима сварки на размер включений. Определены основные критерии выбора режимов сварки, при которых рост неметаллических включений в околошовной зоне не наблюдается.

Ключевые слова: сварка, параметры режима, неметаллические включения, растворение, коалесценция, планирование эксперимента, уравнения регрессии.

В сталях и сплавах всегда присутствует некоторое количество неметаллических включений, которые могут оказывать отрицательное влияние на свойства сталей и во многих случаях являются очагом разрушения. Качество стали зависит не только от содержания в ней неметаллических включений, но и от поведения включений при кристаллизации, распределения их, структуры и последующей деформации. При одном и том же составе стали, но разных способах производства, при различной массе литого металла, условиях кристаллизации и ряда других факторов происходит значительное изменение распределения, формы и размеров, а следовательно, технологических, механических и эксплуатационных характеристик стали [1].

В низколегированных сталях неметаллические включения встречаются преимущественно в виде оксидов, сульфидов, оксисульфидов и нитридов. Их состав, количество, форма и распределение определяются не только химическим составом стали, технологией выплавки и разливки, но и последующей обработкой давлением, которую получают заготовки. Наибольшему изменению при нагреве и деформировании подвержены сульфидные включения, что обусловлено наибольшей диффузионной подвижностью атомов серы (сера имеет наименьшую энергию активации в γ -Fe относительно других элементов внедрения) [2].

Также считается, что растворимость серы в γ -Fe значительно ниже, чем в α -Fe и δ -Fe при соответствующих температурах [3]. Так, при 900 °C в α -Fe она составляет 0,02 %, а при более высокой температуре 920 °C в α -Fe растворимость равна лишь 0,011 %, при 1400 °C в δ -Fe она составляет 0,16 %, а в γ -Fe при 1350 °C – 0,006 %. Кроме этого, основные легирующие элементы (марганец, кремний, микродобавки ниобия, титана и азота) низколегированных сталей, применяемых в производстве сварных конструкций, влияют на растворимость серы в железе и изменяют количество и состав сульфидных включений. В работах [3, 4], рассматривающих термодинамические аспекты процессов изменения неметаллических включений при горячей обработке давлением сталей, отмечается возможность как растворения включений, при нагреве под обработку, так и их коалесценции. Выявлено, что в зависимости от химического состава стали заметное растворение сульфидных при нагреве начинает наблюдаться при температурах выше 1200 °C, и полное их растворение наступает при температуре 1400 °C. При последующем охлаждении стали до температур, когда раствор становится метастабильным, происходит распад и выделение сульфидных частиц.

Процесс выделения сульфидных частиц идет в две стадии, от скорости которых и зависит дисперсность и объемная плотность распределения выделяющихся частиц. Первая стадия представляет собой собственно распад пересыщенного твердого раствора и завершается выделением избыточных сульфидов. Вторая стадия – коалесценция, рост больших по размеру частиц выделившейся фазы за счет исчезновения частиц этой же фазы. Скорость процессов растворения и выделения сульфидных включений лимитируется, в основном, диффузионными процессами и может зависеть от скорости нагрева, температуры и скорости охлаждения. Поэтому в реальных условиях указанные стадии могут накладываться друг на друга. Вместе с тем повышение степени деформации при нагреве может способствовать ускорению растворения включений, так как возникающие при деформации дефекты кристаллического строения облегчают диффузионные процессы [5].

При сварке низколегированных сталей в околошовной зоне вследствие теплового воздействия сварочного источника нагрева основной металл находится в термомеханическом состоянии. В зоне термического влияния складываются предпосылки (высокая температура и высокий уровень напряжений) для изменения формы, размеров и распределения неметаллических включений в процессе сварки. На участке перегрева, где металл нагревается ниже температуры плавления, но выше температуры интенсивного роста зерен, и на участке полной перекристаллизации, где нагрев ниже температуры интенсивного роста зерна до $A_{с3}$, возможны процессы как растворения включений, так и их коалесценции. Возможность изменения морфологической

структуры и конфигурации сульфидных включений в зоне термического влияния при всех способах сварки отмечается в работе [6]. В работах [7, 8] выявлено и количественно показано изменение формы и размеров неметаллических включений в зоне термического влияния низколегированной стали при однопроходной и многослойной полуавтоматической сварке в среде углекислого газа на угловых и стыковых соединениях.

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования являлось установить влияние термического цикла сварки на кинетику изменения размеров неметаллических включений. Исследования проводились на стали 16Г2АФ. В сталях с данной легирующей композицией (Г2АФ) наблюдаются большая анизотропия свойств и особенно понижение пластических свойств с увеличением толщины проката. Ухудшение свойств обусловлено загрязненностью стали неметаллическими включениями. Для выявления эмпирической зависимости влияния параметров режима сварки на изменение неметаллических включений в ЗТВ была составлена матрица планирования эксперимента. Была использована матрица ротатабельного планирования второго порядка с тремя факторами, величина звездного плеча $\alpha = 1,682$. В качестве факторов эксперимента варьировалась сила тока сварки (X_1) – от 110 до 190 А, скорость сварки (X_2) – от 10 до 20 м/ч, температура предварительного подогрева (X_3) – от 20 (без подогрева) до 220 °С. В соответствии с полученной матрицей планирования эксперимента была заварена серия образцов методом жестких проб (крестовых). На вырезанных из образцов поперечных шлифах были проведены качественный металлографический анализ и статистический количественный анализ неметаллических включений с использованием системы анализа изображения металлов и программного комплекса для обработки и анализа изображения «ВидеоТест–Металл 1.0». Количественный анализ проводился на участке перегрева и на участке полной перекристаллизации. В среднем было измерено более 250 включений для каждого режима сварки и в основном металле. По полученным результатам была проведена статистическая обработка: определены средние значения площади, длины и ширины включений и среднеквадратичного отклонения измерений.

Для составления уравнения регрессии, позволяющего математически описать зависимость параметров режима сварки и изменения формы и размеров неметаллических включений, в качестве выходного параметра уравнения было выбрано относительное изменение средней площади неметаллических включений в каждом опыте:

$$\Delta S_i = \frac{S_i - S_{\text{осн.мет}}}{S_{\text{осн.мет}}} 100 \%,$$

где S_i – средняя площадь неметаллических включений в каждом опыте; $S_{\text{осн.мет}}$ – средняя площадь неметаллических включений в основном металле.

В результате обработки экспериментальных данных было получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 11,86 + 5,939 \cdot X_3 + 18,21 \cdot X_2 \cdot X_3 - 6,218 \cdot X_1^2 - 6,012 \cdot X_2^2 + 18,04 \cdot X_3^2. \quad (1)$$

По полученному уравнению было проведено моделирование влияния параметров режима сварки на изменение размеров неметаллических включений аналитически-графическим методом. Данным методом моделирование проводится последовательным изменением в цикле двух факторов. Результаты анализа представлены на рис. 2–3 в виде графика изолиний, при этом один из факторов остается постоянным, а два – переменные.

Проведенный анализ показал неоднозначное влияние силы тока (X_1) и скорости сварки (X_2) на изменение размеров неметаллических включений. Знак «минус» перед четвертым и пятым членами уравнения (1), а также квадрат говорят о том, что как при малых, так и при больших значениях силы тока и скорости сварки возможно не только сохранение размеров включений, но и их уменьшение, т.е. создаются условия для их растворения. При определенных средних значениях будут создаваться условия для увеличения размеров неметаллических включений.

Так, при малых значениях силы тока выделяется невысокая тепловая мощность, ширина участка основного металла, подверженного нагреву, также незначительная, и соответственно, скорость охлаждения этого участка высокая. Таким образом, при нагреве происходит растворение включений в той или иной степени, а при охлаждении процессы коалесценции не успевают произойти из-за высокой скорости охлаждения и наблюдается уменьшение относительной средней площади включений.

При повышении силы тока увеличивается время пребывания основного металла выше интересующих температур и уменьшается скорость охлаждения. При нагреве также происходят процессы растворения включений, но уже в большей степени, а при охлаждении интенсифицируются процессы коалесценции нерастворившихся частиц, что приводит к увеличению относительной средней площади включений.

Дальнейшее повышение силы тока приводит к тому, что при нагреве неметаллические включения практически полностью растворяются и при охлаждении сначала происходят процессы выделения дисперсных частиц включений, что приводит к уменьшению средней площади включений относительно основного металла.

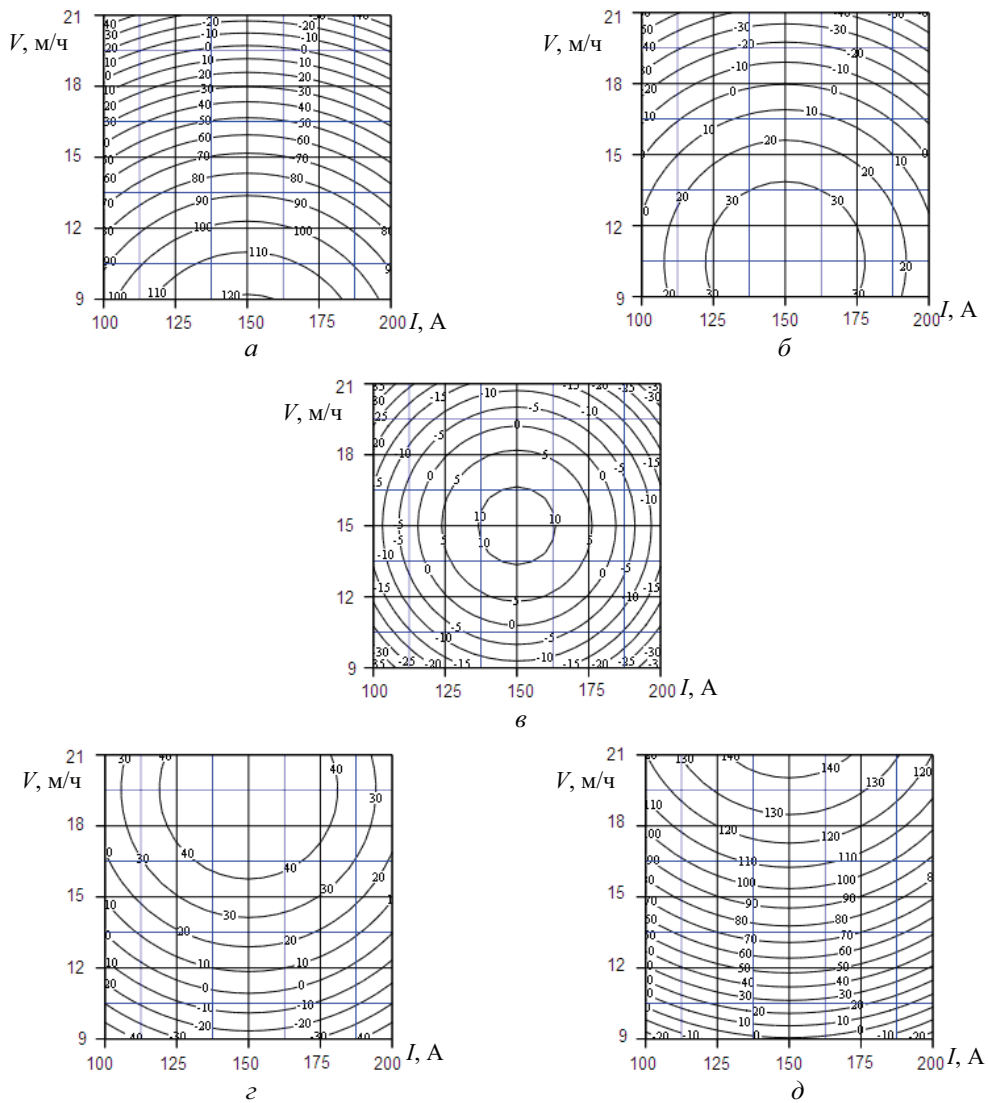


Рис. 1. Влияние силы тока и скорости сварки на изменение относительной площади неметаллических включений при постоянной температуре подогрева:
 $a - 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $б - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $в - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $г - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$; $д - 240\text{ }^{\circ}\text{C}$

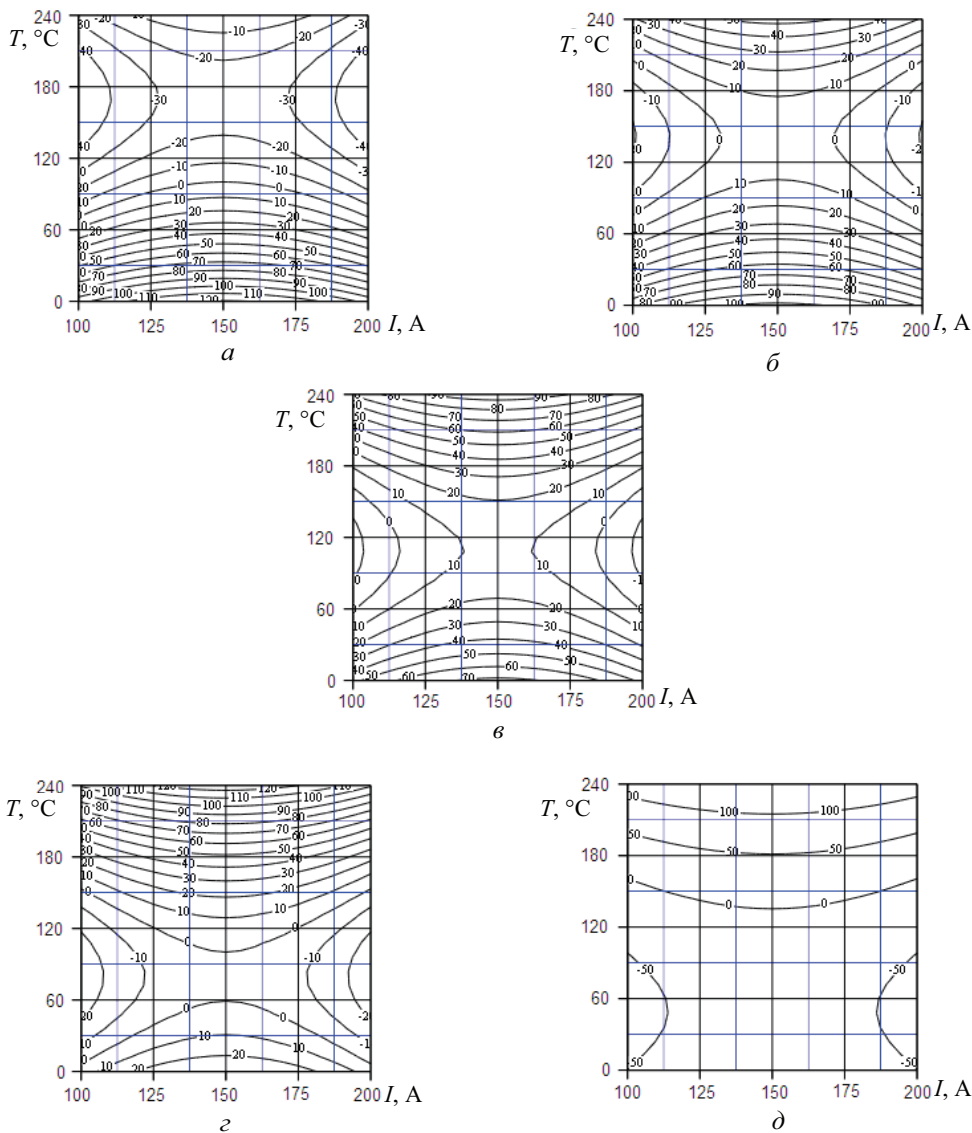


Рис. 2. Влияние силы тока и температуры подогрева на изменение относительной площади неметаллических включений при постоянной скорости сварки: *a* – 9 м/ч; *б* – 12 м/ч; *в* – 15 м/ч; *г* – 18 м/ч; *д* – 21 м/ч

При большой скорости сварки скорость нагрева также высокая, время действия источника теплоты небольшое и скорость охлаждения высокая. Вследствие большой скорости сварки и малого времени действия источника тепла подавляются диффузионные процессы и более полного растворения включений не происходит. При охлаждении из-за высокой скорости процес-

сы коалесценции не успевают произойти и наблюдается уменьшение размеров неметаллических включений.

Снижение скорости сварки приводит к уменьшению скорости нагрева и увеличению времени пребывания при высоких температурах, что способствует более полному растворению неметаллических включений. При охлаждении в силу уменьшения скорости охлаждения происходит коалесценция нерастворившихся частиц, что приводит к увеличению размера включений относительно основного металла.

При очень медленных скоростях сварки создаются условия практически полного растворения неметаллических включений в околошовной зоне при нагреве. И соответственно, при охлаждении сначала идет процесс выделения мелких дисперсных включений, что приводит к уменьшению средней площади включений относительно основного металла.

Температура предварительного подогрева очень сильно влияет на время пребывания околошовной зоны при высоких температурах. При этом при увеличении температуры предварительного подогрева активизируются диффузионные процессы, влияющие и на растворение включений при нагреве, и на процесс коалесценции нерастворившихся частиц и выделившихся вновь при охлаждении.

Таким образом, при сварке низколегированных сталей типа 16Г2АФ возможно избежать увеличения размеров неметаллических включений, являющихся во многих случаях очагами разрушения. Для этого сварку нужно проводить на малой погонной энергии или, наоборот, на большой. При выборе режима сварки необходимо учитывать влияние температуры предварительного подогрева. Кроме этого, нужно учитывать фазовые и структурные превращения, происходящие в металлической матрице околошовной зоны при данных режимах.

Список литературы

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1982. – 415 с.
2. Лившец Л.С. Металловедение сварки. Термическая обработка сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
3. Термодинамика сплавов железа / Б.И. Моргунов [и др.]. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
4. Физическая химия процессов обработки электротехнической стали / Б.И. Моргунов [и др.]. – М.: Металлургия, 1990. – 168 с.
5. Губенко С.И. Трансформация неметаллических включений. – М.: Металлургия, 1991. – 224 с.

6. Гривняк И. Свариваемость сталей: пер. со словац. Л.С. Гончаренко; под. ред. Э.Л. Макарова. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.

7. Ольшанская Т.В. Неметаллические включения в околошовной зоне сварных соединений низколегированных сталей // Сварка. Контроль. Реновация: 6-я всерос. науч.-техн. конф. – Уфа, 2007.

8. Изменение морфологии неметаллических включений в сварных соединениях низколегированных сталей / В.М. Язовских [и др.] // Наука и производство Урала: межрегион. сб. науч. тр. / НФ Моск. ин-т стали и сплавов. – Новотроицк, 2007.

Получено 14.01.2011