



## РОЛЬ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ТРЕЩИН ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Ю. М. КУСКОВ, д-р техн. наук, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук, И. Л. БОГАЙЧУК, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние неметаллических включений в основном металле на возникновение и распространение трещин в наплавленном металле. Показано, что, кроме неметаллических включений, распространению трещин в наплавленном металле способствуют упрочняющие фазы его структуры и полигонизационные границы. Однако последние не являются иницилирующими факторами возникновения трещин.

*Ключевые слова:* основной и наплавленный металлы, неметаллические включения, трещины, упрочняющие фазы, полигонизационные границы

Оптимальный состав износостойкого наплавленного металла выбирают экспериментально либо путем математического моделирования. Вторым вариантом предпочтителен, поскольку менее экономически затратный. Однако, как показывает практика, во многих случаях, особенно при наплавке высокоуглеродистых легированных сталей, на этапе проверки технологичности выбранного наплавочного материала расчетный «оптимальный» состав необходимо корректировать с целью исключения трещин в наплавленном металле. В ре-

зультате такого двойного метода оценки результатов исследования и появляется окончательный состав наплавленного металла. При этом технологическую часть исследований обычно ограничивают рассмотрением процессов, происходящих только в наплавленном металле. Более того, в настоящее время при определенных трудностях экономического порядка с приобретением металла используют стали, «имеющиеся в наличии», хотя и предусматривается проведение качественного химического анализа этого металла.

В данной работе рассматривается влияние качества основного металла на результат наплавки, в частности, появление трещин в наплавленном металле\*.

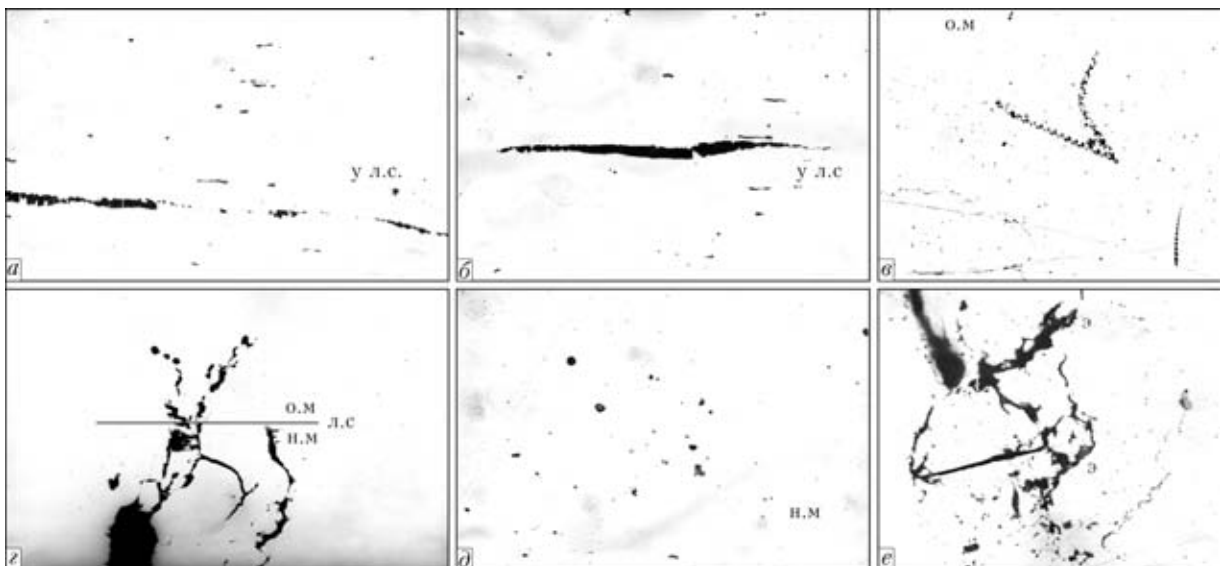


Рис. 1. НВ, дислокации и трещины в основном (о.м) и наплавленном (н.м) металлах: а — строчки глинозема, включения алюмосиликатов и оксисульфидов основного металла,  $\times 400$ ; б — строчки железомарганцевых сульфидов, включения алюмосиликатов и оксисульфидов основного металла,  $\times 400$ ; в — дислокационные строчки, расположенные около трещин в основном металле,  $\times 200$ ; г — трещины, идущие от глобулярных включений основного металла,  $\times 250$ ; д — глобулярные включения в наплавленном металле,  $\times 400$ ; е — трещины, проходящие через эвтектику (э),  $\times 25$

\*В работе принимал участие канд. техн. наук И. И. Рябцев.

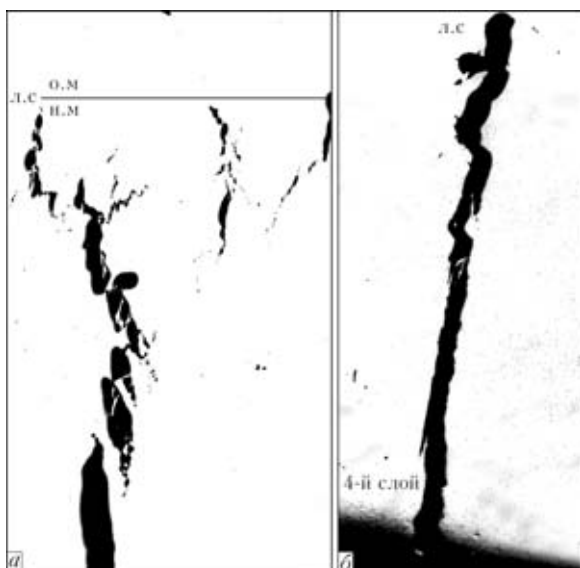


Рис. 2. Распространение зигзагообразной (а) и прямолинейной (б) трещин в четырех слоях наплавленного металла,  $\times 25$

Для наплавки использовали образцы, вырезанные газовой резкой из «имеющегося в наличии» проката стали, по химическому составу соответствующего стали Ст3. В качестве наплавленного металла служили самозащитные порошковые проволоки, обеспечивающие получение высокоуглеродистого ( $C = 1\%$ ) наплавленного металла. Наплавку выполняли в четыре слоя.

После наплавки в наплавленном металле были обнаружены трещины. В связи с малыми (по толщине) размерами трещин их визуально не обнаруживали после нанесения каждого слоя. Поэтому оценить место зарождения трещины сложно. Это можно установить лишь на металлографических шлифах.

Наплавленные образцы по обычной методике подготавливали в виде поперечных шлифов к металлографическому исследованию, которое проводили как на полированных, так и на поверхностях после электролитического травления в 20%-м водном растворе хромовой кислоты.

**Исследование полированных поверхностей шлифов.** В основном металле зафиксировано большое количество неметаллических включений

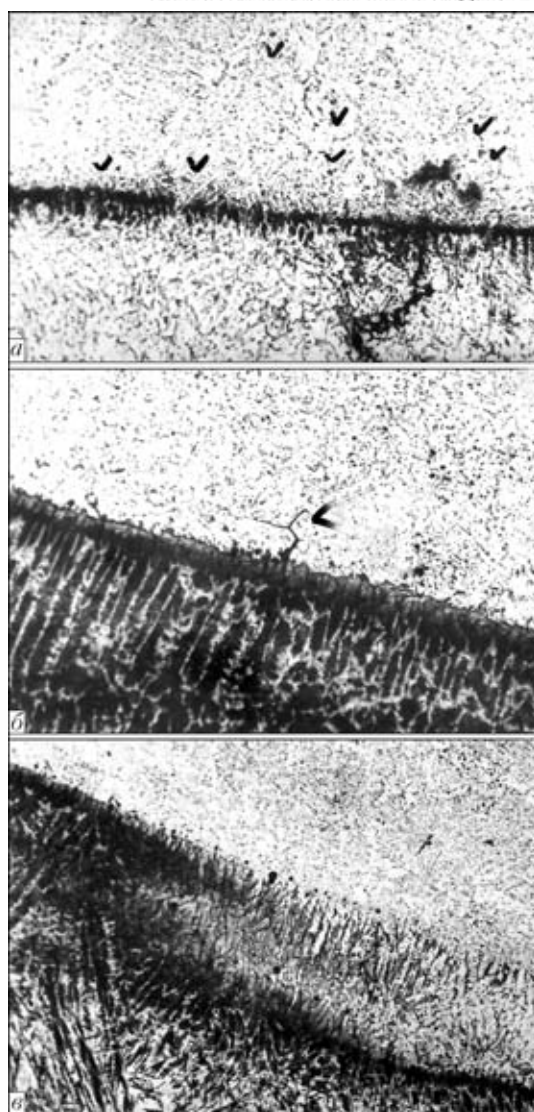


Рис. 3. Глобулярные НВ в основном и наплавленном металле,  $\times 320$ : а — глобулярные НВ основного металла, расположенные у линии сплавления; б — возникновение трещин у НВ основного металла; в — НВ, перешедшие («всплывшие») из 1-го наплавленного слоя во 2-й

(НВ), расположенных в виде строчек различной толщины и протяженности, либо отдельных включений разнообразных форм и размеров. Строчки темно-серого цвета, вытянутые в направлении прокатки, предположительно являются включениями

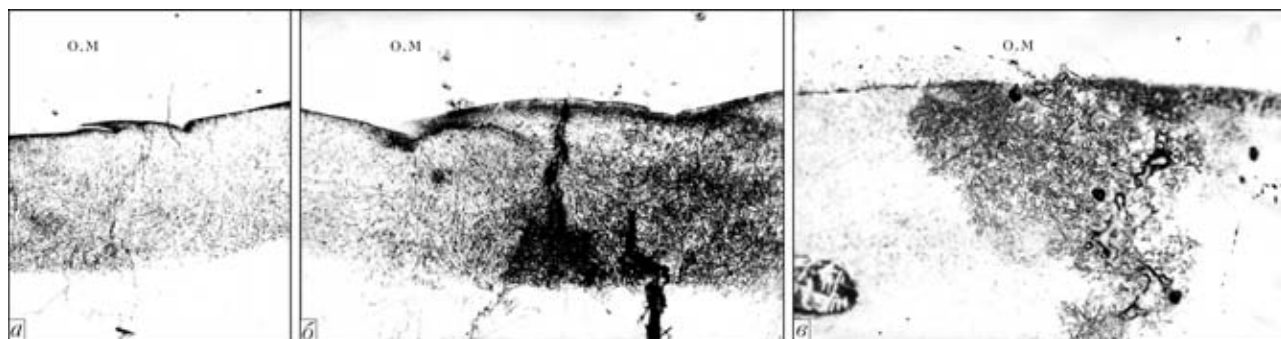


Рис. 4. Трещины в основном и наплавленном металлах,  $\times 50$ : а — трещина, идущая от основного металла в мартенситную составляющую структуры наплавленного металла; б — трещины в мартенситной составляющей 1-го и 2-го наплавленных слоев; в — трещины в эвтектической составляющей структуры 1-го и 2-го наплавленных слоев

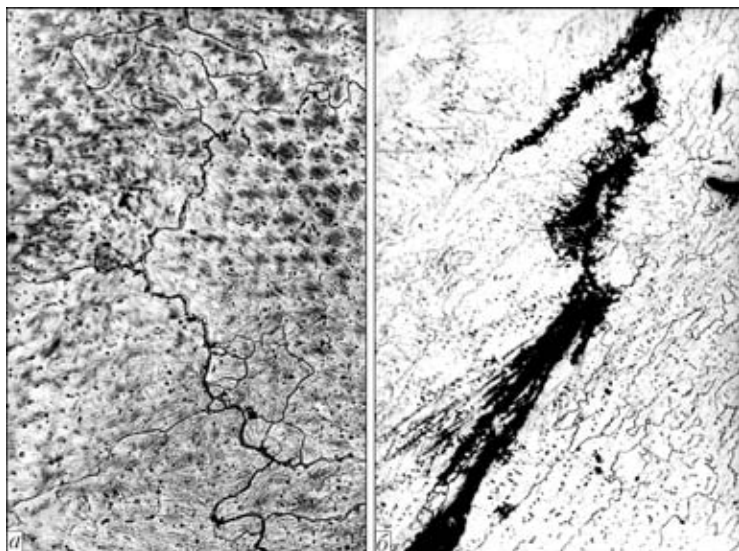


Рис. 5. Распространение трещины в мартенситной составляющей структуры по полигонизационным границам в 1-м слое наплавленного металла: а —  $\times 200$ ; б —  $\times 400$

ями глинозема  $Al_2O_3$  (рис. 1, а). Хотя чаще всего они как относительно хрупкие составляющие разрушаются при прокатке на отдельные частицы. Аналогичное направление расположения имеют железомарганцевые сульфиды  $FeS \cdot MnS$  светло-серого цвета (рис. 1, б).

Отдельными включениями представлены алюмосиликаты  $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ,  $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot FeO$  и окисульфиды (рис. 1, а, б). Такое количество различных НВ создает зоны слабину в основном металле, которые являются местом потенциально

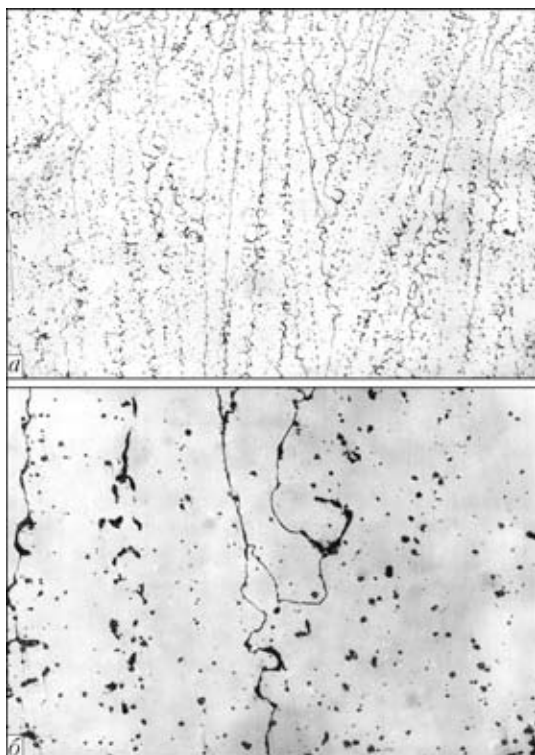


Рис. 6. Полигонизационные границы с эвтектической составляющей структуры литого металла: а —  $\times 100$ ; б —  $\times 400$

возможного зарождения в них трещин. Неоднородность металла и несовершенство его структуры проявляется и в том, что около некоторых трещин отмечены дислокационные строчки (рис. 1, в).

Несмотря на наибольшую опасность с точки зрения зарождения трещин НВ остроугольной формы типа глинозема, кремнезема и т. п. [1], реально трещина может возникнуть в той зоне, где сложилось самое напряженное состояние (рис. 1, з).

Причем даже при наличии в основном металле НВ больших размеров (в виде отдельных включений или крупных строчек) вследствие воздействия на них сварочной дуги происходит их дробление и сфероидизация. В дальнейшем эти округлые частицы поэтапно переходят из основного металла в наплавляемые слои (рис. 1, д). Обнаружено «всплывание» НВ

и их эстафетная передача в каждый последующий наплавляемый слой. Дальнейшее развитие трещин происходит по различным упрочняющим фазам структуры, в частности местам расположения эвтектики (рис. 1, е). В результате трещина может иметь развитую зигзагообразную (рис. 2, а) или прямолинейную форму (рис. 2, б).

**Исследование поверхности шлифов после травления.** Исследование микроструктуры после травления позволяет более детально оценить и уточнить последовательность этапов развития трещины: от момента ее возникновения до завершающей стадии. Зона сплавления основного и первого слоя наплавленного металла с расположением глобулярных НВ в основном металле показана на рис. 3, а. Место возникновения трещины у одного из НВ в основном металле наглядно подтверждается рис. 3, б. Переход НВ с 1-го слоя на границу 2-го, 3-го наплавленных слоев позволяет увидеть рис. 3, в.

Ранее сделанный вывод о распространении трещин в наплавленном металле по зонам расположения упрочняющих фаз — мартенсита, эвтектики — подтверждает рис. 4.

Однако удалось получить новую информацию. Установлено, что путями распространения трещин в наплавленном металле являются не только упрочняющие фазы, но и полигонизационные границы — проявление физической микroneоднородности наплавленного металла [2]. Распространение трещин в зоне расположения мартенсита и полигонизационных границ (идуших по границе полигонизации) показано на рис. 5. Для проверки правильности этого механизма появления и распространения трещин выплавлены небольшие слитки в медном кристаллизаторе диаметром 20 мм и длиной 50 мм. Это позволило исключить



вероятность влияния НВ, что характерно для основного металла.

Трещин в наплавленном металле не обнаружено. Нижняя часть слитка представляет собой мартенсит в аустенитной матрице и развитую сеть полигонизационных границ. Твердость мартенсита  $HV_{0,5} = 5090$  МПа, микротвердость аустенита  $HV_{0,5} = 2710...3030$  МПа. По границам полигонизации расположена эвтектика (рис. 6). Наличие упрочняющих фаз в виде мартенсита и эвтектики, а также полигонизационных границ не является причиной возникновения трещин в наплавленном металле.

### Выводы

1. При наплавке сталей, особенно склонных к возникновению трещин, особое внимание следует обращать на качество основного металла с точки зрения его чистоты от НВ.

2. НВ основном металле могут не только инициировать появление трещин, но и влиять на дальнейшее их распространение в наплавленном металле за счет эффекта «всплывания» из слоя в слой наплавленного металла.

3. Зародившиеся в основном металле трещины распространяются в наплавленном металле не только по НВ и упрочняющим фазам структуры, но и по полигонизационным границам.

4. Упрочняющие фазы структуры наплавленного металла и полигонизационные границы не всегда являются источником появления в нем трещин.

1. Куслицкий А. Б. Неметаллические включения и усталость стали. — Киев: Техніка, 1976. — 128 с.
2. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. — Киев: Гостехиздат УССР, 1962. — 340 с.

The effect of non-metallic inclusions in the base metal on initiation and propagation of cracks in the deposited metal is considered. It is shown that, in addition to the non-metallic inclusions, the propagation of cracks in the deposited metal is also facilitated by the hardening phases present in its structure and polygonisation boundaries. However, the latter themselves are not the factors that initiate the cracks.

Поступила в редакцию 25.05.2011

## ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

29 мая–1 июня 2012 г.

Кацевели, Большая Ялта, Крым, Украина

**Организаторы:** Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Международная ассоциация «Сварка», Благотворительный фонд «Содружество сварщиков»

### Тематика конференции

**Математическое моделирование:** кинетики деформационных процессов; транспорта водорода в сварных соединениях; оценки риска образования холодных (водородных) трещин; остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке; деградации свойств сварных соединений; идентификации дефектов в сварных соединениях.

**Информационные технологии в сварке, наплавке и нанесении покрытий:** расчетно-информационные системы; Internet и информационные услуги в области сварки и родственных технологий.

### Организационный комитет

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ ул. Боженко 11, г. Киев, 03680, Украина  
Зельниченко Александр Тимофеевич,  
тел.: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua  
Романова Ирина Юрьевна,  
тел.: (38044) 205-22-26  
E-mail: romanova@paton.kiev.ua.