

## ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.753.042

Чигарев В.В.<sup>1</sup>, Щетинина В.И.<sup>2</sup>, Щетинин С.В.<sup>3</sup>, Сагиров Д. А.<sup>4</sup>,  
Савкова М.А.<sup>5</sup>, Дмитриев Э.А.<sup>6</sup>, Оприщенко В.А.<sup>7</sup>

### МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ

*Установлены закономерности воздействия высокоскоростной наплавки с низкой погонной энергией на неметаллические включения, микроструктуру и трещиностойкость. Разработан энергосберегающий способ высокоскоростной наплавки валков на низкой погонной энергии.*

**Ключевые слова:** Механизм, трещиностойкость, неметаллические включения, микроструктура, высокоскоростная наплавка, погонная энергия.

*Чигарьов В.В., Щетиніна В.І., Щетинін С.В., Сагіров Д.О., Савкова М.А., Дмитрієв Є.А., Оприщенко В.А. Механізм підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії. Встановлені закономірності дії високошвидкісного наплавлення з низькою погонною енергією на неметалеві включення, микроструктуру і тріщиностійкість. Розроблено енергозберігаючий спосіб високошвидкісного наплавлення валків на низькій погонній енергії.*

**Ключові слова:** Механізм, тріщиностійкість, неметалеві включення, микроструктура, високошвидкісне наплавлення, погонна енергія.

*Chigarev V.V., Shchetinina V.I., Shchetinin S.V., Sagirov D.A., Savcova M.A., Dmitriev E.A., Oprishchenco V.A. The crackfirmness increase mechanism at speed deposited on low energy. The regularities of the high speed deposited with low energy influence on nonmetallic inclusions, microstructure and crackfirmness have been stated. The energy savings method high speed deposited of shaft on low energy have been developed.*

**Keywords:** Mechanism, crackfirmness, nonmetallic inclusions, microstructure, high speed deposited, energy

**Постановка проблемы.** Трещиностойкость прокатных валков, которые работают в условиях высоких удельных давлений и изготавливаются из высокоуглеродистых сталей, определяет износостойкость, расходный коэффициент, материалоемкость процесса и себестоимость проката. Повышение трещиностойкости и разработка энергосберегающей высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии является важной научно-технической проблемой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Эффективным способом повышения трещиностойкости является высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии [1], при которой изменяются условия существования дуги, тепловложение, скорость нагрева, охлаждения, кристаллизации [2, 3] и качества наплавленного металла. Данные влияния погонной энергии на трещиностойкость наплавленного металла противоречивы [2, 4, 5, 6]. Закономерности воздействия формы электрода и погонной энергии на микроструктуру и трещиностойкость наплавленного металла исследованы недостаточно.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>3</sup> канд. техн. наук, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>4</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>5</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>6</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>7</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

**Цель статьи** – изучение механизма повышения трещиностойкости наплавленного металла и разработка энергосберегающего процесса высокоскоростной наплавки валков на низкой погонной энергии.

**Изложение основного материала.** При электродуговой наплавке под действием теплового возбуждения в наплавленном металле возникают вакансии [1], так как энергия активации возникновения вакансий меньше энергии образования межузельных атомов. В зоне возникновения вакансий нарушается статическое равновесие сил межатомного взаимодействия, что приводит к смещению соседних атомов из их равновесных положений и микроискажениям кристаллической решетки.

Для повышения трещиностойкости исследовано влияние формы электрода и погонной энергии на структурные и фазовые превращения путем измерения микроискажений кристаллической решетки методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, микронапряжений, плотности дислокаций и микроструктуры.

Как установлено, форма электрода и погонная энергия значительно влияют на движение дуги, термические циклы, скорость кристаллизации и микроискажения кристаллической решетки, которые максимальны при наплавке перпендикулярной лентой вследствие максимальной скорости охлаждения и пересыщения металла избыточными вакансиями [1]. При наплавке продольной лентой вследствие снижения скорости охлаждения микроискажения кристаллической решетки уменьшаются. При наплавке проволокой и особенно составным электродом в соответствии с более низкой скоростью охлаждения микроискажения кристаллической решетки минимальны.

С уменьшением погонной энергии скорости нагрева, охлаждения и кристаллизации возрастают. Изменение погонной энергии при наплавке лентой, расположенной перпендикулярно и вдоль направления наплавки, не влияет на микроискажения кристаллической решетки вследствие пересыщения металла вакансиями. С повышением скорости наплавки проволочным и составным электродом и снижением погонной энергии микроискажения кристаллической решетки уменьшаются вследствие снижения тепловложения и возникновения вакансий Шоттки.

При изменении микроискажений кристаллической решетки изменяются микронапряжения, которые максимальны при наплавке перпендикулярной и уменьшаются при продольной ленте. При наплавке проволочным и составным электродами на низких погонных энергиях микронапряжения снижаются, так как при уменьшении тепловложения и ускоренном охлаждении снижается уровень пластической деформации [7], что предотвращает разрушение.

Микронапряжения приводят к интенсивному образованию и росту трещин [2], механизм зарождения которых связывают с дислокациями, максимальная плотность которых характерна для наплавки перпендикулярной и продольной лентами. При наплавке проволочным и составным электродом на малых погонных энергиях плотность дислокаций снижается, так как источником дислокаций являются совокупность вакансий и неметаллические включения.

Для определения механизма установленного изменения плотности дислокаций произведена оценка степени загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями на оптическом микроскопе "Vertivol" при увеличении 500 линейным методом. Подсчет индекса загрязненности производился как отношение суммарной длины включений ко всей длине подсчета. Определение химического состава неметаллических включений производилось методом рентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У и методом лазерного микроспектроанализа на лазерном микроспектроанализаторе LMA-10.

Исследования наплавленного металла на оптическом микроскопе при увеличении 400, 500 и растровом электронном микроскопе при увеличении 1000 позволили установить, что в наплавленном металле имеются неметаллические включения, которые можно подразделить на единичные сферические светящиеся, размеры которых более 3 мкм (рис.1а, б, в, г), и большое количество сферических непрозрачных, размеры которых менее 1 мкм (рис.2 а, б, в, г).

Степень загрязненности наплавленного металла с повышением скорости наплавки и уменьшением погонной энергии снижается вследствие увеличения скорости движения жидкого металла и интенсивных конвективных потоков в сварочной ванне, которые выносят неметаллические включения, кремний и марганец, на поверхность (рис.1, рис.2).

Установленное влияние формы электрода и погонной энергии на степень загрязненности наплавленного металла хорошо согласуется с их воздействием на плотность дислокаций.

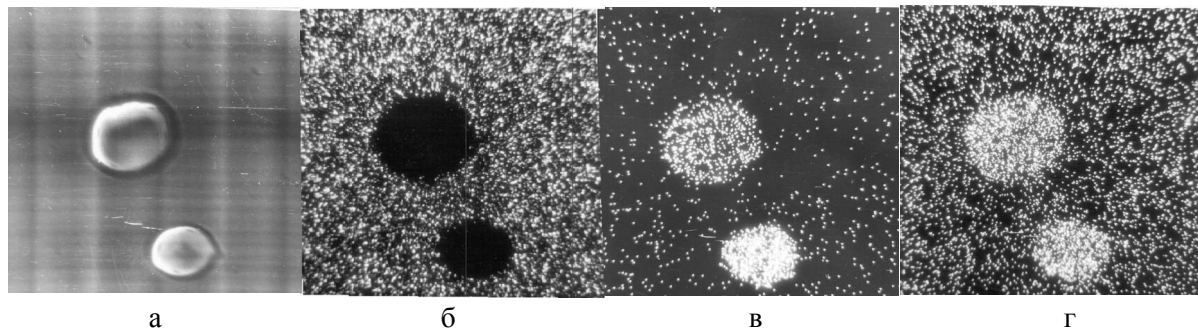


Рис.1 – Неметаллические включения размером более 3-х микрон (а) и рентгеновские спектрограммы распределения железа (б), кремния (в), марганца (г),  $\times 1500 \times 0,5$

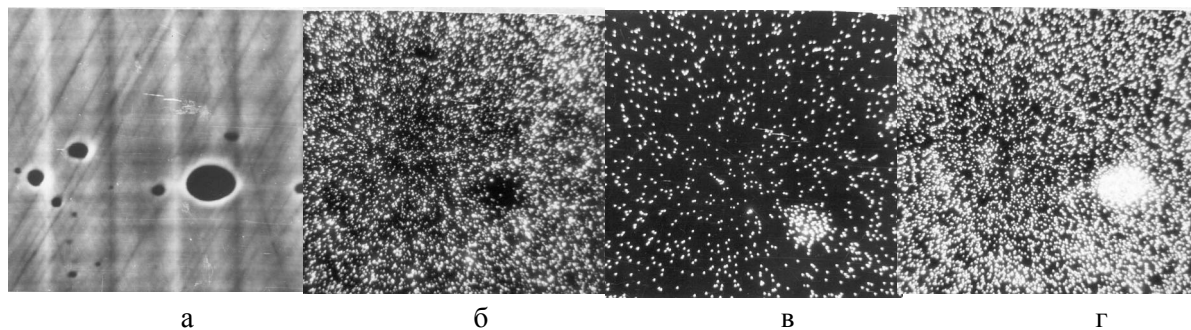


Рис.2 – Неметаллические включения размером менее микрон (а) и рентгеновские спектрограммы распределения железа (б), кремния (в), марганца (г),  $\times 4000 \times 0,5$

Из установленной закономерности можно сделать вывод, что форма электрода и погонная энергия вследствие влияния на движение дуги, термические циклы, скорость кристаллизации и плотность дислокаций воздействуют на трещиностойкость наплавленного металла.

При высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии уменьшение степени загрязненности наплавленного металла приводит к снижению вакансий, плотности дислокаций и повышению стойкости к образованию трещин. Вследствие уменьшения тепловложения и ускоренного охлаждения снижается уровень пластической деформации [7], что предотвращает разрушение. Поэтому при высокоскоростной наплавке повышается трещиностойкость.

При повышении скорости и снижении погонной энергии вследствие уменьшения тепловложения деформация металла и сварочные напряжения снижаются, что значительно повышает трещиностойкость, которая зависит от микроструктуры (рис.3).

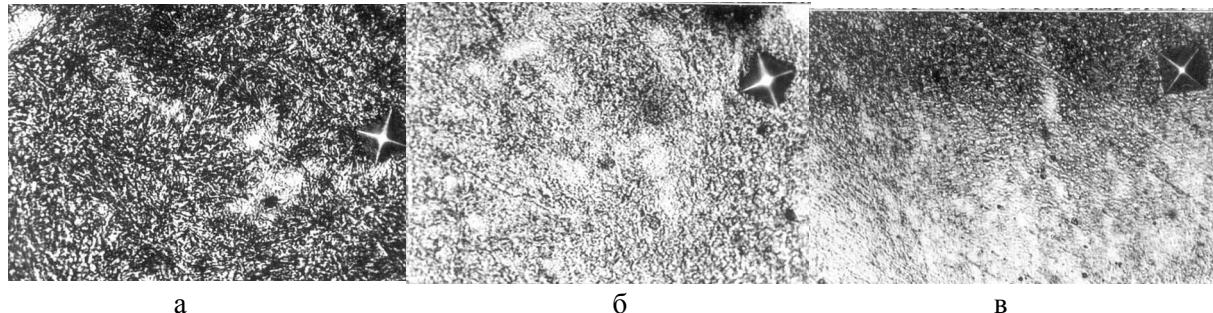


Рис.3– Микроструктура металла, наплавленного проволокой с погонной энергией 3,6 МДж/м (а); 2,7 МДж/м (б); 1,8 МДж/м (в) ,  $\times 300$

Закономерность воздействия погонной энергии на микроструктуру устанавливали при пятислойной наплавке на пластины размером  $(30 \times 300 \times 400) \cdot 10^{-3}$  м проволокой диаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м, лентой размером  $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$  м, расположенной в продольном и перпендикулярном направлении, и составным электродом. Наплавку производили под керамическим флюсом ЖСН-5 на оптимальных для каждого способа режимах. Наплавку проволочным электродом Св08Г2С диаметром 4 мм производили при величине тока 650-750 А, напряжении на дуге 31–33 В и ско-

рости сварки  $(0,56; 0,83 \text{ и } 1,1) \cdot 10^{-2}$  м/с, продольной и перпендикулярной лентой –  $I = 450 - 550$  А,  $U = 29 - 31$  В,  $V_H = (0,33, 0,5 \text{ и } 0,67) \cdot 10^{-2}$  м/с, составным электродом –  $I = 1950 - 2050$  А,  $U = 29 - 31$  В,  $V_H = (1,4; 2,1 \text{ и } 2,8) \cdot 10^{-2}$  м/с. При этом погонная энергия для каждого способа сварки изменялась в пределах  $q_H/V = 1,8; 2,7 \text{ и } 3,6$  МДж/м.

Как установлено, при повышении скорости нагрева и охлаждения возрастает дисперсность микроструктуры (рис.3) и трещиностойкость наплавленного металла. При наплавке продольной лентой микроструктура наплавленного металла крупнозернистая и неоднородная. При наплавке перпендикулярной лентой микроструктура незначительно измельчается, оставаясь крупнозернистой. Наплавка проволочным и составным электродом приводит к измельчению микроструктуры, которая представляет собой феррито-цементитную смесь и является мелкодисперсной и однородной. Аналогично измельчается микроструктура наплавленного металла и околошовной зоны при высокоскоростной наплавке, что является следствием повышения скорости нагрева и охлаждения и увеличения количества центров кристаллизации, которые, располагаясь перед фронтом растущих столбчатых кристаллитов, подавляют их дальнейший рост. В результате увеличения скорости нагрева зерна аустенита не успевают вырасти и устойчивость аустенита снижается. При охлаждении распад неустойчивого мелкозернистого аустенита происходит в верхнем субкритическом интервале температур с образованием сорбита и перлита, что предотвращает образование холодных трещин. В результате минимальных микроискажений кристаллической решетки, микронапряжений, плотности дислокаций и мелкодисперсной, однородной структуры повышается трещиностойкость и ударная вязкость сварных соединений.

При высокоскоростной наплавке возрастает скорость кристаллизации жидкого металла ванны, которая прямо пропорциональна скорости сварки:  $V_{KP} = \cos\alpha V_{CB}$ . Поэтому при повышении скорости наплавки и уменьшении погонной энергии измельчается структура и обеспечивается получение однородной мелкодисперсной микроструктуры (рис.3), что хорошо согласуется с имеющимися данными [8].

Измельчение микроструктуры является одним из основных способов предотвращения образования горячих трещин, для чего производят модифицирование наплавленного металла путем введения модификаторов типа титан и алюминий. При высокоскоростной наплавке измельчение микроструктуры обеспечивается за счет уменьшения погонной энергии, что повышает стойкость к образованию горячих трещин.

В результате измельчения микроструктуры при высокоскоростной наплавке с низкой погонной энергией увеличивается площадь контакта и силы межзатомного взаимодействия, вследствие чего возрастает трещиностойкость и износостойкость наплавленного металла.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые способы наплавки, повысить качество наплавленного металла и износостойкость деталей металлургического оборудования.

### Выводы

1. С помощью оптического микроскопа установлено, что при увеличении скорости наплавки уменьшается степень загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями и плотность дислокаций, что повышает трещиностойкость.
2. Методом рентгеноструктурного анализа и лазерного микроспектроанализа установлен химический состав неметаллических включений, основными из которых являются марганец и кремний.
3. Установлен механизм повышения трещиностойкости при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии за счет уменьшения степени загрязненности и плотности дислокаций, микроискажений кристаллической решетки и микронапряжений, сварочных напряжений и измельчения микроструктуры.
4. Высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии обеспечивает повышение трещиностойкости и износостойкости деталей металлургического оборудования.

### Список использованных источников:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке / Н.Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.

2. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М.: Наука, 1972. – 228 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М.: Metallurgy, 1970. – 376с.
4. Батакшев А.Ф. Новая проволока для автоматической дуговой сварки под флюсом стали 09Г2С без скоса кромок /А.Ф. Батакшев, С.Н. Бережницкий, Е.И. Гуревич и др. // Сварочное производство. – 1988. – №1. – С.23–24.
5. Сулова Е.А. Влияние технологических факторов на склонность к образованию трещин / Е.А. Сулова, В.А. Игнатов, А.С. Зубченко //Сварочное производство. – 1990. – №5.– С.35–36.
6. Иванова Н.В. Хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений резервуарных конструкций /Н.В. Иванова, В.Н. Дикун, В.А. Винокуров //Сварочное производство. – 1985. – №11.– С.15–17.
7. Мялин М.И. Влияние термомодеформационного цикла на технологическую прочность при наплавке бронзы на серый чугун // М.И. Мялин, В.М. Сагалевиц, В.Н. Турыгин и др. //Сварочное производство. – 1988. – №3.– С.10–11.
8. Барышев В.М. Работоспособность металла однопроходного шва при высокой скорости охлаждения при сварке /В.М. Барышев // Сварочное производство.–1985 – №6.– С.14–16.

Рецензент: А.Д. Размышляев  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 12.04.2010

УДК 621.791.042:621.187.3

**Лазебнов П. П.<sup>1</sup>, Патюпкин А. В.<sup>2</sup>, Иванов В. П.<sup>3</sup>**

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И МЕТАЛЛУРГИИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*В статье рассмотрены возможности использования отходов водоподготовительных установок, использующихся в энерго- и металлургическом производствах. Предложено использовать шлам установок химводоочистки в качестве шлакообразующего компонента сварочных материалов как альтернативу мрамору.*

**Ключевые слова:** шламы химводоочистки, утилизация отходов, сварочные материалы, металлургическое производство.

**Лазебнов П. П., Патюпкин А. В., Иванов В. П.** В статті розглянуті можливості використання відходів водопідготовчих установок, що використовуються в енерго- і металургійному виробництвах. Запропоновано використовувати шлам установок хімоводоочищення як шлакоутворюючого компоненту зварювальних матеріалів як альтернативу мармуру.

**Ключові слова:** шлами хімоводоочищення, утилізація відходів, зварювальні матеріали, металургійне виробництво.

**Lazebnov P.P., Patyupkin A. V., Ivanov V.P.,** *Using of secondary raw materials in welding production. The article describes the possibilities of utilization of water preparation slurry used in energy and metallurgical productions. It is offered to use this kind of secondary raw materials as a slag formation component of welding materials as an alternative to the marble.*

**Keywords:** water preparation slurry, utilization of wastes, welding materials, metallurgical production.

**Постановка проблемы.** В настоящее время в теплоэнергетике на ГРЭС, ТЭС, АЭС и ТЭЦ для технологических целей применяют глубокоочищенную воду, полученную методом

<sup>1</sup> канд. техн. наук, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

<sup>2</sup> канд. техн. наук, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

<sup>3</sup> канд. техн. наук, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь