

УДК 621.791.92

© Иванов В.П.<sup>1</sup>, Степнова Ю.А.<sup>2</sup>**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ГАБАРИТНЫХ ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ГЕТЕРОГЕННЫМ РАБОЧИМ СЛОЕМ**

*Исследованы способы увеличения работоспособности прокатных валков путем повышения стойкости к зарождению и развитию трещин за счет анизотропии свойств рабочего слоя. Предложена конфигурация рабочего слоя валка, позволяющая продлить срок службы за счет оптимального соотношения модулей упругости соседних слоев.*

**Ключевые слова:** прокатные валки, композиционный слой, соотношение модулей упругости, электродуговая наплавка, долговечность.

**Иванов В.П., Степнова Ю.О. Вдосконалення технології наплавлення габаритних валків гарячої прокатки гетерогенним робочим шаром.** Досліджено способи збільшення працездатності прокатних валків шляхом підвищення стійкості до зародження і розвитку тріщин за рахунок анізотропії властивостей робочого шару. Запропонована конфігурація робочого шару валка, що дозволяє продовжити термін служби за рахунок оптимального співвідношення модулів пружності сусідніх шарів.

**Ключові слова:** прокатні валки, композиційний шар, співвідношення модулів пружності, електродугове наплавлення, довговічність.

**V.P. Ivanov, Yu.O. Stepnova. Improving the technology of surfacing heterogeneous working layer on hot rolling bulky rolls.** Ways to increase efficiency of rolls by enhancing resistance to the formation and development of cracks due to the anisotropy of the working layer properties were explored. The destruction mechanisms of such materials were considered. The possibility of cracks deceleration, due to the layer ruptures or abrupt change of its properties has been marked. It has been shown that the optimum combination of the means braking dislocations provides for a rational metal alloying. The analysis of the rolls of rolling mills service conditions as well as the analysis of types of wear and destruction of products made it possible to formulate requirements on the surface layer of the rolls properties. However increase in strength decreases ductility and toughness of the steel. The solution of the problem of the strength and plasticity increase necessitates either methods of metal deep cleaning of contaminants development or significant grain refinement. The part played by structural formations, such as non-metallic inclusions, carbide particles, grain boundaries, etc. in the kinetics of crack propagation has been studied. Since sharp contrast of the properties at the grain boundaries is inconsistent with the requirements of welding technology, the determining factor for making up the working layer is the service conditions. The durability of the roll is determined by allowable wear out of the layer between resharpenings. The correct choice of optimum parameters for the two adjacent layers - operating and the layer to be maintained is the reserve to improve performance of the roll. The paper has proposed welding-up compositions making it possible to extend the durability due to the optimum ratio of the mechanical and thermal properties of adjacent layers. This approach can improve the durability of the deposited products both at the stage of nucleation and at the stage of thermal fatigue cracks growth.

**Keywords:** mill rolls, composite layer, the ratio of the elastic modulus, the electric arc overlaying, durability.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [ivanov.v.p@pstu.edu](mailto:ivanov.v.p@pstu.edu)

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

**Постановка проблеми.** Повышение надежности и долговечности машин и агрегатов требует использования технологий упрочнения, обеспечивающих не только высокую износостойкость рабочей поверхности, но и необходимую сопротивляемость зарождению и развитию трещин (рис. 1, а, б). Это тем более справедливо для крупногабаритных стальных деталей оборудования горячей прокатки (роликовых направляющих машин непрерывного литья заготовок, рабочих валков обжимных и листовых станов, роликов моталок и рольгангов и т.д.), поверхность которых в процессе эксплуатации интенсивно растрескивается под воздействием ударов, циклических теплосмен в сочетании со знакопеременными механическими нагрузками. Развитие поверхностных трещин вглубь изделий приводит к непрогнозируемым разрушениям (рис. 1, б), остановкам металлургических агрегатов, потерям производства, ухудшению экологической обстановки.

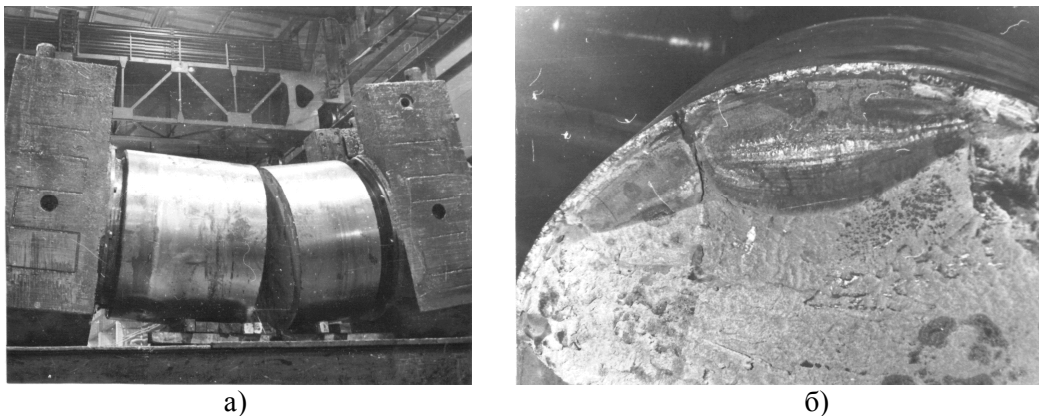


Рис. 1 – Усталостное разрушение наплавленного прокатного валка: а) – внешний вид валка с подшипниковыми узлами после разрушения; б) – макростроение зоны зарождения и распространения трещины

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ литературных данных [1-8], проведенные исследования и промышленная эксплуатация наплавленных изделий показали, что перспективны два метода торможения трещин в наплавленном слое: создание микроскопических барьеров на пути трещин и торможение трещин с помощью системы других трещин.

Получение трещиностойких наплавленных композиций, как однослойных [1], так и многослойных [2], требует разработки научных основ металлургии и технологии процессов наплавки, обеспечивающих возможность управления структурной макронеоднородностью от слоя к слою или же в пределах каждого слоя [3, 4]. При этом торможение трещины может быть достигнуто за счет контрастного изменения состава и свойств слоев и образования расслоений на границе с пластичным слоем, разрушающихся по микровязкому или смешанному механизмам [5, 6]. Другим путем получения в наплавленном металле слоистых композиционных структур является поверхностное упрочнение [7]. Следует также отметить возможность «замораживания» трещины, не достигшей критических размеров, разрывами сплошности поверхности либо на границах наплавленных участков с различными физико-механическими свойствами [7, 8].

**Цель статьи** – обосновать необходимость исследования и разработать технологию наплавки экономнолегированными материалами слоев с композитной структурой, способной тормозить разрушение при статическом, усталостном и ударном нагружении.

**Изложение основного материала.** Валки горячей прокатки подвержены многократным теплосменам из-за больших частот вращения (200-400 об/мин) и характеризуются высоким уровнем термических напряжений на рабочей поверхности (до 200-300 МПа) [9] и образованием сетки трещин разгара (рис. 2).

В сочетании с динамичным режимом работы и высоким уровнем контактных напряжений это определяет основные требования к материалу валков - высокая трещиностойкость, т.е. способность тормозить развитие усталостной трещины и жаростойкость. Основной вид изнашивания валков - термомеханический. Поверхность валков горячей прокатки испытывает интенсив-

ный износ в широком диапазоне температур, что и определяет основные требования к его составу [10]. Для повышения недостаточной износостойкости валковых сталей (50ХН, 55Х, 60ХН, 70Х2М, 90Х, 90ХФ и др.) И.И.Фруминым было предложено наплавлять на поверхность валков слой инструментальной стали 30Х2В8Ф [11]. К.К. Хренов и Д.М. Кушнерев [12] предложили легирующие керамические флюсы, позволяющие в широких пределах варьировать состав наплавленного металла, а К.В. Багрянский [13] показал, что их применение эффективно для наплавки валков горячей прокатки. Легирующая часть флюсов ЖС-400, ЖС-450, ЖС-500, ЖСН-1 разрабатывалась [14], исходя из представлений о необходимости получения в наплавленном слое 0,40-0,80% углерода, 4-10% хрома, до 2,5-3,5% марганца. Стойкость таких сталей против абразивного износа достаточно высока, а введение в их состав молибдена, ванадия, вольфрама повышает теплостойкость, твердость при нормальных и повышенных температурах. Однако, как и сталь 30Х2В8Ф, они характеризуются низкой технологической прочностью и трещиностойкостью. Поскольку на поверхности деталей всегда имеются микро- и макроскопические трещины валика, вероятно, их развития вглубь изделий под воздействием циклических механических нагрузок, теплосмен, ударов, приводящего к разрушениям.

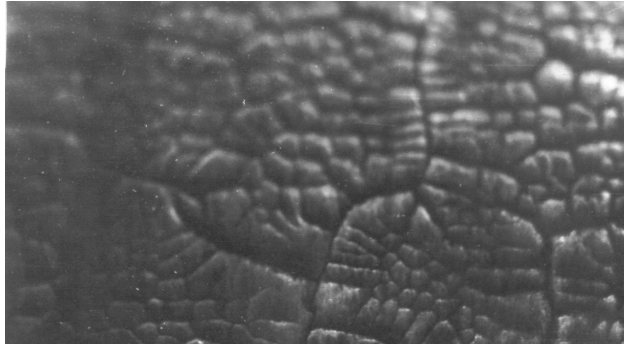


Рис. 2 – Сетка разгара на поверхности бочки валка слябинга 1150

При многослойной наплавке рассматриваемые стали склонны к отслаиванию [15], что потребовало разработки комплекса мер для повышения эксплуатационных характеристик наплавленных изделий [16]. Проблема резко усложняется, когда речь идет о крупногабаритных деталях, для которых трудно обеспечить высокотемпературный подогрев в процессе наплавки.

По-видимому, целесообразно использовать наплавленные слои, состав и структура которых характеризуется достаточной трещиностойкостью, а необходимая сопротивляемость пластическому деформированию достигается поверхностным упрочнением. К таким материалам можно отнести, например, сталь 25Х5ФМС [17].

Обзор новейших теорий процесса изнашивания при трении металлов без применения смазки, получивших экспериментальное подтверждение, свидетельствует [18], что образование частиц износа обусловлено циклическими пластическими деформациями, процессами зарождения и распространения трещин. В однофазных металлах и сплавах в процессе износа развивается тонкая, сильно деформированная зона, расположенная в непосредственной близости от поверхности и характеризующаяся тонкой ячеистой субструктурой дислокаций. В гетерогенных сплавах процесс зарождения трещин может происходить в результате нарушения связей между упрочняющей фазой и матрицей либо при растрескивании самой упрочняющей фазы. Она напоминает поверхность, образующуюся в результате процессов вязкого разрушения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что поверхностный слой изделий должен удовлетворять как требованиям высокой стойкости к пластическим деформациям, так и к зарождению и распространению трещин.

Повышения сопротивления деформации удастся добиться, если затормозить, в результате воздействия на структуру металла, подвижные дислокации. Такое торможение можно осуществить путем образования сегрегаций атомов легирующих элементов вокруг дислокаций в твердых растворах, повышения плотности дислокаций, создания барьеров для движущихся дислокаций в виде поверхностей раздела или частиц второй упрочняющей фазы, а также упорядоченных атомных построений [19]. Оптимальное сочетание средств торможения дислокаций

обеспечивает рациональное легирование металла. Однако с повышением прочности монотонно снижается пластичность и вязкость стали [20]. Поэтому при создании эффективных препятствий на пути движения дислокаций, чтобы не допускать их опасных скоплений, необходимо сделать барьеры полупроницаемыми [21]. Решение задачи повышения прочности и пластичности требует разработки методов глубокой очистки металла от вредных примесей либо значительного измельчения зерна. Это может быть реализовано при получении структуры скоростной закалки [22].

Важную роль в кинетике распространения трещин играют также структурные образования более крупные, чем дислокации, неметаллические включения, карбидные частицы, границы зерен и т.д. С одной стороны, такие включения являются зародышами трещин, а с другой – могут их тормозить [23].

Стремление получить в наплавленном слое комплекс требуемых служебных характеристик, организованную слоистость при высокой контрастности свойств неизбежно вступает в противоречие с возможностями технологии. Поскольку износостойкость или коррозионная стойкость наплавленного металла, как правило, резко отличается от таких характеристик основного металла, необходимо ограничить разбавление им шва. Вместе с тем, при дуговой сварке надежное и стабильное проплавление, исключающее образование непроваров (несплавления), как правило, достигается лишь при значениях доли участия  $\gamma > 30-40\%$ . При таких значениях не только снижается работоспособность наплавленного металла, но и возрастает число слоев  $n$ , которое необходимо наплавить, чтобы исключить содержание примесей основы. Значения  $n$  можно определить из известного уравнения:

$$C_n = C_{н.м.} - C_{н.м.} \cdot \gamma^n, \quad (1)$$

где  $C_n$  – концентрация элементов в  $n$ -ом слое;

$C_{н.м.}$  – концентрация элементов в наплавленном слое, не содержащем примесей основного;

$n$  – число слоев.

Кроме того, на работоспособность наплавленного слоя и изделия в целом влияют также и условия эксплуатации. Для прокатного вала его долговечность определяется допустимым износом слоя, расходуемого в процессе прокатки и при переточках (перешлифовках). В этом случае, даже если рабочий слой такого вала обладает высокой трещиностойкостью, долговечность его недостаточна, поскольку чередование слоев с более высокими и более низкими значениями модуля упругости не учитывает допустимых величин износа за одну кампанию, а также величины съема металла при переточках (перешлифовках).

Повышение срока службы валков и снижение трудоемкости их механической обработки после каждой кампании прокатки в этом случае достигается тем, что рабочий слой бочки вала выполнен двумя материалами с различными модулями упругости, чередующимися по высоте наплавленного слоя (рис. 3). При этом толщина слоя с меньшим модулем упругости определяется в соответствии с выражением [24]:

$$\delta_1 = c (1 + k), \quad (2)$$

а толщина слоя с большим модулем упругости равна:

$$\delta_2 = u (1 - k), \quad (3)$$

где  $c$  – величина съема металла за одну переточку, мм;

$u$  – допустимая величина износа за одну кампанию в месте наибольшего нагружения, мм;

$k$  – эмпирический коэффициент, учитывающий необходимость уменьшения толщины более твердого слоя и увеличения толщины более мягкого слоя.

Максимальное количество слоев с толщинами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определено, исходя из минимального и максимального диаметров бочки вала в соответствии с выражением:

$$n_{\max} = (D_{\max} - D_{\min}) / \delta_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{ср}}$  – средняя толщина слоя.

$$\delta_{\text{ср}} = (\delta_1 + \delta_2) / 2. \quad (5)$$

Значение  $n_{\max}$  округляется до целого значения, причем количество более пластичных слоев –  $n_1 = n_2 + 1$ , где  $n_2$  – количество более износостойких слоев.

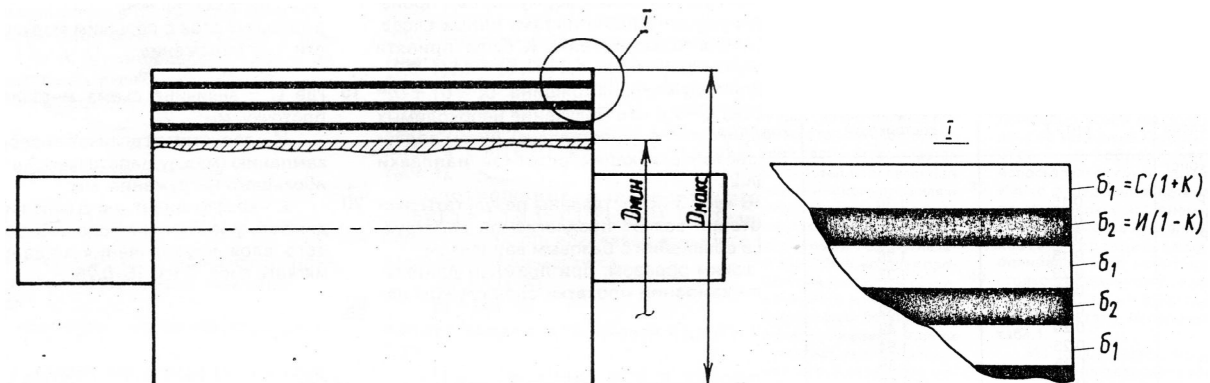


Рис. 3 – Конструкция многослойного наплавленного слоя прокатного вала, выполненная материалами с различными модулями упругости

За время кампании в результате износа рабочего слоя вала расположенный на поверхности более износостойкий слой  $\delta_2$  изнашивается, выводя наружу нижележащий более пластичный слой  $\delta_1$ . При переточке мягкий слой удаляется и уступает место износостойкому слою. В результате механической обработки верхняя часть износостойкого слоя дополнительно упрочняется в результате наклепа, что увеличивает ресурс работы слоя.

При соотношении  $\delta_1 > c(1+k)$  оставшаяся после обработки значительная часть более мягкого слоя интенсивно изнашивается в процессе прокатки, уменьшая диаметр и производительность прокатки. К этому же результату приводит и соотношение  $\delta_2 < b(1-k)$ . В этом случае толщина более износостойкого слоя недостаточна для эксплуатации вала в течение кампании. Если же  $\delta_1 < c(1+k)$ , а  $\delta_2 > b(1-k)$ , при механической обработке будет удалена значительная часть износостойкого слоя.

Испытания серии рабочих валков, наплавленных слоями 18ХГСА и 25Х5ФМС по предлагаемой технологии, показали, что при прежней длительности кампании прокатки срок службы наплавленных валков увеличивается в 1,4 раза [24].

Дополнительные возможности повышения работоспособности слоистого рабочего слоя заключаются в использовании изменения по толщине наплавленного слоя не только прочностных, но и теплофизических характеристик. При наплавке композиций материалами с различающимися теплофизическими свойствами следует отметить наличие перепада остаточных напряжений на границе слоев. В случае скачкообразного уменьшения растягивающих осевых напряжений при переходе на нижележащий наплавленный слой возможно торможение трещины вплоть до ее остановки. Эксплуатация наплавленных роликов МНЛЗ из стали 25Х1М1Ф аустенитными материалами, обладающими большим коэффициентом термического расширения, показала прекращение роста трещин в глубину, что позволило увеличить долговечность изделия на стадии развития трещины [25]. Вместе с тем, снижение уровня остаточных напряжений в тонком поверхностном слое приводит к повышению работоспособности на стадии ее зарождения.

Таким образом, управляя размерами (толщиной) соседних слоев композиций, наплавленных на прокатные валки, их уровнем легирования, а также микро- и макроструктурой, можно значительно повысить ресурс этого дорогостоящего инструмента и снизить эксплуатационные расходы и, следовательно, себестоимость проката.

### Выводы

1. Ресурс крупногабаритных валков горячей прокатки определяется наряду с износостойкостью рабочей поверхности, способностью активного слоя сопротивляться зарождению трещин и распространению вглубь деталей. Основную роль в установлении ресурса наплавленного слоя и изделия в целом играет сопротивляемость распространению трещин.

2. Учитывая зависимость вязкости разрушения от структурной микро- и макронеодно-

родности, намечены пути торможения разрушения в однослойных и многослойных композициях за счет контрастного изменения свойств наплавленных слоев и образования расслоений на их границе.

3. Создание слоистых композиций на поверхности стальных деталей оборудования горячей прокатки потребовало исследования и разработки способов наплавки, обеспечивающих необходимый уровень легирования каждого слоя и высокую контрастность свойства на границах слоев. Предпочтительным способом нанесения таких слоев по литературным данным и результатам исследований является наплавка ленточными электродами.

4. Показаны пути увеличения работоспособности наплавленных прокатных валков за счет управления размерами и свойствами смежных слоев в наплавленном рабочем слое.

#### Список использованных источников:

1. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако. – М. : Мир, 1982. – 232 с.
2. Патон Б.Е. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Б.Е. Патон [и др.] – Киев : Наукова думка, 1984. – 288 с.
3. Патон Б.Е. Слоистая сталь для сварных конструкций / Б.Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. – 1981. – № 7. – С.1-4.
4. Потапов Н.Н. Слоистые металлические композиции / Н.Н. Потапов [и др.] – М. : Metallurgia, 1986. – 215 с.
5. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек [и др.]. – М. : Высшая школа, 1980. – 366 с.
6. Патон Б.Е. Новая сварная конструкция гасителя протяжных разрушений магистральных газопроводов / Б.Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. – 1983. – № 7. – С. 1-5.
7. Лещинский Л.К. Трещиностойкость многослойного наплавленного металла, упрочненного высококонцентрированным источником нагрева / Л.К. Лещинский [и др.] // Сварочное производство. – 1987. – № 4. – С. 23-25.
8. Гулаков С.В. Разработка и освоение конструкций биметаллических деталей и инструментов с регламентированным распределением свойств рабочего слоя, технологии и автоматизированного оборудования для его нанесения : автореф. дис. ...д-р техн. наук : 05.03.06 / С.В. Гулаков; Приазов. гос. техн. ун-т. – М., 1989. – 48 с.
9. Третьяков А.В. Расчет и исследование прокатных валков / А.В. Третьяков, Э.А. Гарбер, Г.Г. Давлетбаев. – М. : Metallurgia, 1976. – 256 с.
10. Трейгер Е.И. Повышение качества и эксплуатационной стойкости валков листовых станков / Е.И. Трейгер, В.П. Приходько. – М. : Metallurgia, 1988. – 192 с.
11. Фрумин И.И. Современные методы механизированной наплавки / И.И. Фрумин // Сварка и специальная электрометаллургия : Сб. науч. тр. – Киев : Наукова думка, 1984. – С. 130-138.
12. Хренов К.К. Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки / К.К. Хренов, Д.М. Кушнерев. – Киев : Держтехвидав УРСР, 1961. – 263 с.
13. Багрянский К.В. Наплавка под керамическим флюсом деталей металлургического оборудования / К.В. Багрянский // Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки. – Киев : Держтехвидав УРСР, 1961. – С.198-216.
14. Багрянский К.В. Электродуговая сварка и наплавка под керамическими флюсами / К.В. Багрянский. – Киев : Техника, 1976. – 183 с.
15. Багрянский К.В. Об отколах слоя хромистой стали, наплавленного на сталь 55Х или 60ХГ / К.В. Багрянский, В.Н. Кальянов, П.Ф. Лаврик // Автоматическая сварка. – 1963. – № 9. – С. 26-30.
16. Кальянов В.Н. Повышение сварочно-технологических и эксплуатационных характеристик износостойких экономно-легированных сплавов при наплавке интенсивно изнашивающихся стальных деталей : автореф. дис. ...д-р техн. наук : 05.03.06 / В.Н. Кальянов; Укр. инж.-пед. акад. – Харьков, 1989. – 32 с.
17. Кондратьев И.А. Структура и свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками марок ПП-Нп-25Х5ФМС и ПП-Нп-30Х4В2М2ФС / И.А. Кондратьев, В.Г. Васильев, В.А. Довженко // Оборудование и материалы для наплавки. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. – С. 56-60.
18. Глэрдон Р. Износ истиранием несмазываемых разнородных металлов. Обзор литературы /

- Р. Глэрдон, И. Финни // Теоретические основы инженерных расчетов. Труды Американского общества инженеров-механиков. – 1981. – № 4. – С. 82-93.
19. Бернштейн М.Л. Прочность стали / М.Л. Бернштейн. – М. : Металлургия. – 1974. – 200 с.
  20. Гуляев А.П. К вопросу о механических свойствах конструкционных сталей / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка. – 1989. – № 7. – С. 6-8.
  21. Панасюк В.В. Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, В.В. Андрейкив, В.З. Партон. – Киев : Наукова думка, 1988. – 488 с. – (Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие : в 4-х т.; Т. 1).
  22. Утевский Л.М. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа / Л.М. Утевский, Е.Э. Гликман, Г.С. Карн. – М. : Металлургия, 1987. – 222 с.
  23. Armstrong F.W. Weld cladding with wire electrodes / F.W. Armstrong // Weld and Metal Fabrication. – 1973. – 39. – № 3. – P. 87-89.
  24. Иванов В.П. Разработка системы автоматизированного проектирования технологического процесса наплавки деталей металлургического оборудования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / В.П. Иванов; Приазовский гос. техн. ун-т. – Мариуполь, 1996. – 26 с.
  25. Домбровский Ф.С. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона, 1995. – 198 с.

#### Bibliography:

1. Fudzii T. Fracture mechanics of composite materials / T. Fudzii, M. Dzako. – М. : Mir, 1982. – 232 p. (Rus.)
2. Paton B.Y. Multilayer steel in weldments / B.Y. Paton [et al.]. – Kiev: Naukova dumka, 1984. – 288 p. (Rus.)
3. Paton B.Y. The layered steel for welded structures / B.Y. Paton [et al.] // Automatic welding, 1981. – № 7. – P. 1-4. (Rus.)
4. Potapov N.N. Layered metal composition / N.N. Potapov [et al.]. – М. : Metallurgiya, 1986. – 215 p. (Rus.)
5. Broek D. Fundamentals of fracture mechanics / D. Broek. – М. : Vysshaya shkola, 1980. – 366 p. (Rus.)
6. Paton B.Y. New welded absorber lingering devastation of trunk pipelines / B.Y. Paton [et al.] // Automatic welding. – 1983. – № 7. – P. 1-5. (Rus.)
7. Leshchinskiy L.K. The fracture toughness of a multilayer weld metal reinforced with a highly concentrated heat source / L.K. Leshchinskiy [et al.] // Welding production. – 1987. – № 4. – P. 23-25. (Rus.)
8. Gulakov S.V. Design and development of structures of bimetallic parts and tools with regulated distribution properties of the working layer technology and automated equipment for its application : Phd. thesis : 05.03.06 / S.V. Gulakov; Priazovskyi state technical university. – М., 1989. – 48 p. (Rus.)
9. Tretyakov A.V. Calculation and study of the mill rolls / A.V. Tretyakov, E.A. Garber, G.G. Davletbayev. – М. : Metallurgiya, 1976. – 256 p. (Rus.)
10. Treiger E.I. Improving the quality and operational stability of rolls of sheet mills / E.I. Treiger, V.P. Prihod'ko. – М. : Metallurgiya, 1988. – 192 p. (Rus.)
11. Frumin I.I. Modern methods of mechanized welding / I.I. Frumin // Welding and special electro-metallurgy : Collection of scientific works. – Kiev : Naukova dumka, 1984. – P. 130-138. (Rus.)
12. Hrenov K.K. Ceramic fluxes for automatic welding and surfacing / K.K. Hrenov, D.M. Kushneryev. – Kiev : Derzhtekhvidav URSR, 1961. – 263 p. (Rus.)
13. Bagryanskiy K.V. Surfacing under the flux ceramic parts of metallurgical equipment / K.V. Bagryanskiy // Ceramic fluxes for automatic welding and surfacing. – Kiev : Derzhtekhvidav URSR, 1961. – P. 198-216. (Rus.)
14. Bagryanskiy K.V. Arc welding and surfacing under the ceramic fluxes / K.V. Bagryanskiy. – Kiev : Technica, 1976. – 183 p. (Rus.)
15. Bagryanskiy K.V. About spalls of chromium steel layer, deposited on steels 55Cr and 60CrMn / K.V. Bagryanskiy, V.N. Kaliyanov, P.F. Lavrik // Automatic welding. – 1963. – № 9. – P. 26-30. (Rus.)
16. Kaliyanov V.N. Increasing the welding and operating characteristics of wear-resistant alloys during surfacing of steel parts with intensive wear : Phd. thesis : 05.03.06 / V.N. Kaliyanov; Ukrainian Engineering Pedagogics Academy. – Kharkiv, 1989. – 32 p. (Rus.)

17. Kondratiev I.A. The structure and properties of metal, deposited with 25Cr5VMoSi and 30Cr4W2Mo2VSi cored wires / I.A. Kondratiev, V.G. Vasiliyev, V.A. Dovzhenko // Equipment and materials for overlaying. – Kiev : IES im. Ye.O. Patona, 1990. – P. 56-60. (Rus.)
18. Glerdon R. Wear abrasion unlubricated dissimilar metals. Review / R. Glerdon, I. Finni // Theoretical Foundations of engineering calculations. Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. – 1981. – № 4. – P. 82-93.
19. Bernstein M.L. Strength of steels / M.L. Bernstein. – M. : Metallurgiya. –1974. – 200 p. (Rus.)
20. Gulyaev A.P. About the mechanical properties of structural steels / A.P. Gulyaev // Metallurgy and heat treatment. – 1989. – № 7. – P. 6-8. (Rus.)
21. Panasyuk V.V. Fundamentals of fracture mechanics / V.V. Panasyuk, V.V. Andreikiv, V.Z. Parton. – Kiev : Naukova dumka, 1988. – 488 p. – (Fracture mechanics and strength of materials : reference edition : in 4 vol.; Vol. 1). (Rus.)
22. Utevskiy L.M. Reversible temper brittleness of steel and iron alloys / L.M. Utevskiy, Y.E. Glikman, G.S. Karn. – M. : Metallurgiya, 1987. – 222 p. (Rus.)
23. Armstrong F.W. Weld cladding with wire electrodes / F.W. Armstrong // Weld and Metal Fabrication. – 1973. – 39. – № 3. – P. 87-89.
24. Ivanov V.P. Development of CAD-system for surfacing technology of details of metallurgical equipment : Phd. thesis : 05.03.06 / V.P. Ivanov; Priazovskyi state technical university. – Mariupol, 1996. – 26 p. (Rus.)
25. Dombrovsky F.S. Working capacity of surface rollers of stock continuous casting machines / F.S. Dombrovsky, L.K. Lechtchinski. – Kiev : IES im. Ye.O. Patona, 1995. – 198 p. (Rus.)

Рецензент: В.И. Щетинина  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 24.09.2015

УДК 621.791.753.042

© Щетинин С.В.\*

### ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Установлены закономерности влияния формы электрода и погонной энергии на скорость охлаждения и кристаллизации жидкого металла сварочной ванны. Разработан способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающий измельчение микроструктуры, снижение сварочных напряжений и повышение трещиностойкости деталей металлургического оборудования.*

**Ключевые слова:** *скорость кристаллизации, измельчение микроструктуры, сварочные напряжения, высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии.*

**Щетинін С.В. Підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії деталей металургійного обладнання.** *Встановлені закономірності впливу форми електроду і погонної енергії на швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Розроблено спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує здрібнення микроструктури, зниження зварювальних напруг і підвищення тріщиностійкості деталей металургійного обладнання.*

**Ключеві слова:** *швидкість кристалізації, здрібнення микроструктури, зварювальні напруги, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.*

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г.Маріуполь, [schetinin.sergey2012@yandex.ua](mailto:schetinin.sergey2012@yandex.ua)