

УДК: 669-5:621.771: 669.018.25

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Быстров В.А.<sup>1</sup>, Борисова Т.Н.<sup>1</sup>, Грекова Н.Ю.<sup>1</sup>, Франк Е.Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФБГОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Рассмотрены способы управления электрошлаковым процессом изготовления биметаллических прокатных валков. При изготовлении биметаллических валков методом напрессовки бандажа из твёрдого сплава на ось валка, на контактной поверхности ось-бандаж возникают термические и контактные напряжения прокатки, вызывающие образованию сколов. Для устранения этих недостатков, разработан способ электрошлакового процесса (ЭШП) изготовления биметаллических прокатных валков с использованием электрода-соленоида. С целью управления ЭШП электрод-соленоид изготавливается из разнонаправленных витков порошковой проволоки и устанавливается внутри оси валка, куда заливается расплавленный шлак и жидкий металл. При расплавлении электрода-соленоида, за счёт теплового воздействия на внутренней поверхности бандажа проплавляются канавки, соответствующие профилю электрода-соленоида. После кристаллизации создаётся «эффект винта» между металлом оси валка по отношению к бандажу. За счёт встречного направления образующихся контактных напряжений в этой зоне происходит релаксация тангенциальных напряжений на контактной поверхности ось-бандаж при реверсивной работе прокатных валков. Расплавленный металл порошковой проволоки за счёт конвективного потока и электромагнитных сил прижимается к стенке бандажа и создаёт демпфирующую прослойку, близкую по теплофизическим свойствам материала бандажа, что приводит к снижению радиальных термических напряжений. Таким образом, практически полностью устранены причины образования сколов на контактной поверхности ось-бандаж биметаллического валка прокатного стана.

Ключевые слова: биметаллический валок, твёрдый сплав, электрод-соленоид, контактная поверхность оси валка, управление электрошлаковым процессом, релаксация напряжений

## THE MANAGEMENT OF ELECTROSLAG PROCESS OF MANUFACTURE OF BIMETALLIC ROLLING ROLLS

Bystrov V.A.<sup>1</sup>, Borisova T.N.<sup>1</sup>, Grekova N.YU<sup>1</sup>, Frank E.YA.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FBGOU HE "Siberian State industrial University, Novokuznetsk"

Learn how to manage the electroslag one process of manufacture of bimetallic mill rolls. In the manufacture of bimetallic press-on method brace carbide roll axle, on the contact surface of the axle-bandage arise thermal and voltage rolling contact, causing the formation of chips. To address these shortcomings, the electroslag process (ESR) method was developed manufacture of bimetallic mill rolls using electrode-solenoid. To control the ESR electrode-solenoid is made of various revolutions of flux cored wire and installed inside the roll axis, where poured molten slag and liquid metal. When ESR, as melting electrode-solenoid, due to heat exposure on the inner surface of the brace incomplete penetration grooves that match the profile of the electrode-solenoid. After crystallization effect is created between the metal screw roll axis towards axle-bandage. Due to the oncoming direction formed contact stresses in this zone occurs relaxation tangential stresses on the contact surface of the axle-bandage with reversible work mill rolls. Molten metal flux cored wire due to convective flow and electromagnetic force is pressed against the wall brace and creates a damping layer, close to the thermal properties of the material of the brace, which leads to a decrease in radial thermal stresses. Thus, almost completely eliminated reasons chips on the contact surface of the axle-bandage bimetallic swaths of rolling mill.

Keywords: bimetallic roller, cemented carbide alloy, electrode-solenoid, contact surface of the roll axis, the electroslag one management process, stress relaxation.

Проблемы экономии материальных ресурсов в металлургической промышленности напрямую связаны с износостойкостью быстроизнашивающихся деталей оборудования, к которым относятся валки прокатных станов, определяющие производительность прокатки и её себестоимость. Следовательно, с целью повышения производительности прокатных станов, улучшения качества металлопродукции и снижения себестоимости готового проката, необходимо увеличивать стойкость прокатных валков – основного рабочего инструмента прокатных

станов. Техничко-экономические показатели работы прокатных станов свидетельствуют: стоимость прокатных валков составляет 6% всей стоимости прокатного стана; на перевалку валков уходит 20...25% времени работы прокатного стана; в общих расходах по переделу затраты на валки по стану горячей прокатки составляют примерно 15...17% [1–2]. Всё это свидетельствует об актуальности рассматриваемого материала статьи.

При эксплуатации валки прокатного стана находятся в сложном напряжённом состоянии (трение, постоянные теплосмены, удары, изгибающие нагрузки, окисление) вызывающие образование в нем различных дефектов, снижающих производительность прокатки. Однако до настоящего времени нет принятой всеми теории, позволяющей на основе данных о параметрах прокатки определить необходимые свойства материала валка, поэтому считается, что свойства валка и свойства материала, из которого он изготовлен, суть разные категории. Возрастающие требования к качеству проката, освоение производства новых труднодеформируемых сталей и сплавов, а также интенсификация процесса прокатки и необходимость получения качественной продукции требует не только постоянного совершенствования свойств рабочей поверхности валков, но и значительного увеличения срока их службы. С этой целью используются биметаллические прокатные валки, бандажи для которых изготавливают из твёрдых сплавов типа ВК-6, ВК-8, ВК-15, обладающих высокими механическими и термодинамическими свойствами, что увеличивает жёсткость валков, обеспечивая повышение точности и улучшение качества проката. Твёрдосплавные бандажи напрессовывают на оси валка с коэффициентом линейного расширения близким твёрдым сплавам, что обуславливает увеличение стойкости валков до 50 раз. Причинами, сдерживающими широкое применение твёрдосплавных бандажей, являются высокая стоимость, нарушение сопряженности бандажа и оси, и разрушения бандажа в процессе эксплуатации [2-4].

В процессе эксплуатации при передаче крутящего момента прокатки с оси на бандаж образуется контактное напряжение, а вследствие того, что материал бандажа отличается от металла оси валка по теплофизическим свойствам, возникают радиальные термические напряжения. Образующиеся суммарные напряжения приближаются к пределу прочности материала поверхности раздела, что приводит к образованию трещин с последующим расслоением контактной поверхности ось-бандаж. В целях повышения износостойкости биметаллических твёрдосплавных валков зарубежные исследователи изменяли микроструктуру и регулировали механические свойства переходной зоны ось-бандаж [5-7]. Авторами статьи для уменьшения напряжений прокатки разработаны и запатентованы новые способы и устройства для изготовления биметаллических прокатных валков с использованием электрошлаковых технологий с упрочняющими твёрдосплавными частицами и применение электрода-соленоида с заливкой жидкого металла в форму с соосно установленным твёрдосплавным

бандажом [8-9].

Вопросы изготовления биметаллических прокатных валков, учитывая их актуальность, ежегодно рассматриваются на различных конференциях прокатчиков, например, результаты исследований зарубежных авторов приведены в работах как по совершенствованию изготовления валков [10-11], так и по армированию биметаллических валков твёрдыми частицами на основе карбидов и карбонитридов титана [12-13]. Повышению износостойкости биметаллических прокатных валков послужило использование технологий, основанных на применении электрошлаковой наплавки (ЭШН), однако объём публикаций как зарубежных [10-13], так и отечественных [14-16] авторов в области разработки новых процессов невелик, что объясняется сложностью формирования структуры и свойств наплавленного металла, а также необходимостью разработки новых специализированных для ЭШН экспериментального оборудования и наплавочных материалов, в том числе и наиболее эффективных – порошковых проволок, обеспечивающих гарантированный переход тугоплавких твёрдых частиц в наплавленный металл.

**Цель работы.** Разработка и внедрение новых композиционных материалов и технологий, обеспечивающих повышение износостойкости и срока эксплуатации биметаллических бандажированных валков прокатных станов, на основе исследований физико-химических процессов износа и легирования наплавленного металла, а также теплофизических процессов электрошлаковой наплавки.

Для управления процессом ЭШН упрочнения биметаллических валков прокатного стана были использованы следующие научно-технические разработки:

1. Исследованы температурно-силовые условия работы и кинетика износа биметаллических валков прокатного стана. Выявлены причины, характер изменения структуры и свойств контактной поверхности ось-бандаж упрочнённых прокатных валков, подверженных термосиловому воздействию, а также обобщены и развиты представления о физико-химических процессах их изнашивания. Сформулированы требования к наплавленному металлу и обоснованы системы его легирования [2, 17–19].

2. Разработаны химсостав и конфигурация порошковой проволоки электрода-соленоида для ЭШН с температурой эксплуатации до 900°C, а также композиционный сплав на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН-20 для упрочнения бандаж. На основе исследования электро- и теплофизических закономерностей ЭШН с применением электрода-соленоида разработаны новые приёмы наплавки, обеспечивающие формирование демпфирующего слоя на внутренней контактной поверхности ось-бандаж прокатного валка [8, 9].

3. Разработан механизм формирования гетерофазной, композиционной структуры на контактной поверхности ось-бандаж, под действием электромагнитных сил и конвективного по-

тока ЭШН, заключающийся в перераспределении легирующих элементов порошковой проволоки и бандажа в зоне контакта, а также образование области химической микронеоднородности, характеризующейся выделениями, имеющие стабильный размер, морфологию и распределение. Установлена величина соотношений токов электрода-соленоида в заданных пределах, создающая в нем термические условия для равномерного расплавления компонентов порошковой проволоки и формирование необходимого по химическому составу расплавленного металла в заданной зоне [9, 20].

4. Реализованы в промышленности научно-обоснованные технологические процессы ЭШН биметаллических валков электродом-соленоидом, а также установлены функциональные взаимосвязи между параметрами ЭШН и износостойкостью упрочнённых валков прокатного стана.

Для упрочнения биметаллических прокатных валков авторами статьи предложены способы изготовления бандажей, армированных спечённым твёрдым сплавом на основе ТН 20, и устройства для получения биметаллических прокатных валков, которые позволяют при изготовлении бандажированного валка создать зону сопряжения, способную демпфировать внутренние термические напряжения на границе сплавления ось–бандаж [2, 9]. Устройство для изготовления биметаллических прокатных валков представлено на рисунке 1.

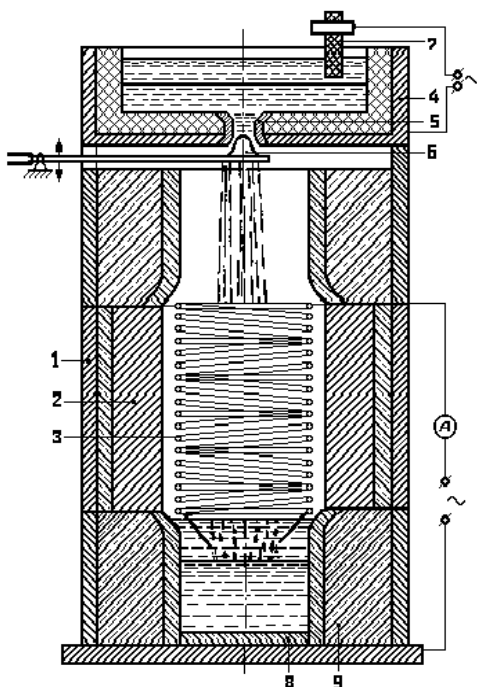


Рисунок 1 – Устройство для изготовления биметаллических валков прокатного стана:

1 – литейная форма; 2 – твёрдосплавной бандаж; 3 – электрод-соленоид; 4 – промежуточное устройство; 5 – сталеразливочный стакан; 6 – стопорное устройство; 7 – графитовый электрод; 8 – электрод-затравка; 9 – кокиль.

Роль демпфера выполняет металлическая прослойка между материалом бандажа и металлом оси валка, полученная при плавлении расходуемого электрода-соленоида (преимущественно порошковой проволоки). Способ был апробирован при изготовлении комплектов

валков на ОАО «НКМК». Управление тепловложением при плавлении электрода-соленоида, осуществляется стабилизацией тока относительно заранее заданного тока наплавки автоматическим поднятием/опусканием запорной части стопорного устройства. Если рабочая величина тока наплавки превысила заданную величину, то стопорное устройство поджимается к сливному стакану и уменьшает подачу металла в полость бандажа, при этом межэлектродный промежуток возрастает, сопротивление шлаковой ванны увеличивается, а рабочий ток наплавки уменьшается.

Задачей новых разработок является создание устройства, позволяющего повысить качество бандажированных прокатных валков за счёт управляющих воздействий [20, 21]. Жидкий металл, заливаемый из промежуточного устройства, попадая в шлаковую ванну, благодаря эмульгированию и десульфурации, в очищенном виде попадает в металлическую ванну. При плавлении электрода-соленоида в шлаковой ванне за счёт электрошлакового процесса (ЭШП) бандаж нагревается и частично оплавляется, причём контур оплавления повторяет контур электрода-соленоида, т.е. по спирали.

Управление ЭШП необходимо для регулирования глубины металлической ванны, чтобы её отношение к поперечному диаметру бандажа находилось в пределах 0,8...1,2. Это условие можно трактовать как приближенный критерий качества кристаллического строения металла оси, гарантирующий равномерность плотности металла по сечению, отсутствие дефектов усадочного и ликвационного происхождения и благоприятное направление роста кристаллитов. Кристаллизация металла оси валка происходит в относительно небольшой по объёму металлической ванне в условиях непрерывного поступления в неё жидкого металла, подаваемого через сталеразливочный стакан из промежуточного устройства. При заливке металла в форму за счёт кинетической энергии движущейся струи и электромагнитного поля электрода-соленоида происходит интенсивное перемешивание жидкого металла и расплавленного шлака, что вызывает повышение качества заливаемого металла расплавом шлака.

Для снижения радиальных тангенциальных составляющих напряжения  $P_k$ , возникающих при передаче момента прокатки с оси на бандаж в контактной поверхности ось-бандаж, секция электрода-соленоида, закрученная по часовой стрелке, образует тангенциальные напряжения направленные направо ( $\rightarrow$ ), а секция электрода-соленоида, закрученная против часовой стрелки, образует тангенциальные напряжения направленные налево ( $\leftarrow$ ), таким образом, при эксплуатации биметаллических валков прокатного стана тангенциальные напряжения на контактной поверхности ось-бандаж частично релаксируются. При передаче момента прокатки с оси валка на бандаж образуется главный вектор напряжения (см. рис. 2), который образует две составляющие – радиальные напряжения  $P_k$  и тангенциальные напряжения  $\sigma_t$ .

Тангенциальные напряжения рассчитываются по формуле (1):

$$\sigma_{\tau} = P_{\kappa} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi), \quad (1)$$

где  $\psi$  – угол подъёма резьбы (угол наклона секции электрода-соленоида);  
 $\varphi$  – угол трения на контактной поверхности ось-бандаж, формула (2):

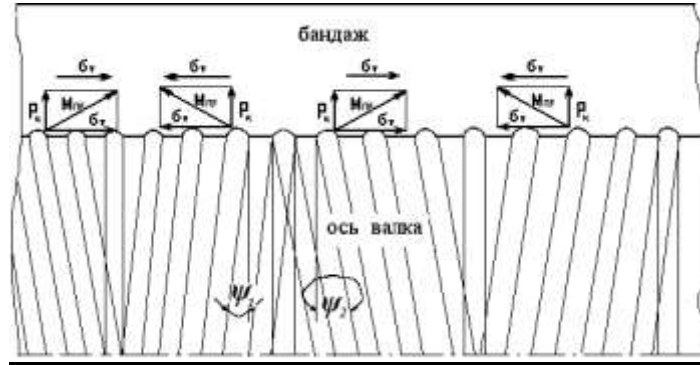


Рисунок 2 – Схема релаксации внутренних тангенциальных напряжений на контактной поверхности ось-бандаж, образованных встречными витками электрода-соленоида.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f_{\text{тр}}}{\operatorname{Cos} \beta / 2}; \quad (2)$$

где  $f_{\text{тр}} = 0,14$  – коэффициент трения сталь-сталь при температурах прокатки;  
 $\beta \approx 120$  град – угол заострения профиля проплавления канавки в бандаже.

Исследование макро- и микроструктуры биметаллической отливки бандажированного прокатного валка, полученного ЭШП электродом-соленоидом с заливкой жидкого металла в осевую полость валка, показало, что в зоне сплавления отсутствуют непровары, усадочная рыхлость, сопутствующая литейному способу заливки металла, трещины (возникающие при других способах наплавки валков) [3-5]. Поверхность сплавления повторяет форму электрода-соленоида за счёт электромагнитного потока, что способствует релаксации тангенциальных напряжений, и предохраняет от сколов наплавленного металла.

Изготовление бандажей, армированных твёрдым сплавом на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН 20, осуществляли в специальном устройстве [8, 9]. Выбор компонентов композиционного материала подробно описан в работах [17–19], при разработке которых использовались данные зарубежных авторов [11–13], что способствовало повышению износостойкости наплавленного бандажа.

При таких режимах скорость расплавления порошковой проволоки электрода-соленоида составила: 4...4,5 см/с; скорость подъёма зеркала металлической ванны оси валка 4 мм/с; время заполнения осевого пространства жидким металлом порядка 0,07 ч; производительность процесса ЭШН бандажированного валка 56708 кг/ч; удельный расход электроэнергии на 1 кг металла, полученного ЭШП составляет 0,11 кВт. ч/кг. Расчёты показали, что удельный расход электроэнергии нового способа ЭШП изготовления бандажированных валков (0,11 кВт.ч/кг), по сравнению с известным способом ЭШП (1,5...2 кВт.ч/кг), что пример-

но в 14 раз меньше.

### **Выводы.**

1. Управление плавлением электрода-соленоида осуществляется стабилизацией тока относительно заранее заданного тока наплавки автоматическим поднятием/опусканием запорной части стопорного устройства, регулирующего скорость подачи жидкого металла в форму с твёрдосплавным бандажом.

2. Радиальные термические напряжения регулируются заданным химическим составом порошковой проволоки электрода-соленоида, при расплавлении которой на внутренней поверхности бандаж за счёт электромагнитных сил и конвективного потока создаётся демпфирующая прослойка близкая по химическому составу и термомеханическим свойствам материалу бандаж.

3. Проплавленные канавки на внутренней поверхности бандаж, повторяющие профиль разнонаправленных витков электрода-соленоида, создают эффект «закручивающегося винта» в процессе прокатки между осью и бандажом.

### **Список литературы**

1. Медовар Л.Б. Проблемы и перспективы производства современных прокатных валков / Л.Б. Медовар, В.К. Грановский // Проблемы СЭМ. 2013. – № 6. – С. 34–47.

2. Быстров В.А. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла / В.А. Быстров, П.К. Дьяков // Изв. вуз. Чёрная металлургия. –2014. – № 5. –С. 24-29.

3. Петраков О.В. Исследование и разработка технологии получения биметаллических отливок прокатных валков с высокой эксплуатационной стойкостью рабочего слоя. – Режим доступа: <http://rsl/rsl01003357979.txt> (Дата обращения: 21.11.2017).

4. Покровский А.М. Численное определение остаточных напряжений в биметаллическом прокатном валке после наплавки. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27161659> (Дата обращения 21.11.2017).

5. Microstructure, mechanical properties and wear resistance of high speed rolls for hot rolling mills / M. A. de Carvalho, R. R. Xavier // Ibid. 2012, P. 685-694.

6. Nylen T. Development of carbide reinforced rolls for hot rolling // Rolls 2012+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers Birmingham, UK, April 12-14, 2012. P. 121-127.

7. Kudo T. HSS rolls: carbide morphology and properties // Rolls 2012 + «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers Birmingham, UK, April 12-14, 2012. P. 71-80.

8. Быстров В.А. Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе: дисс.... докт. техн. наук. Барнаул, 2003. 337 с.

9. Быстров В.А. Использование электрошлаковых технологий для повышения эффективности производства проката. / Вестник РАЕН (ЗСО), Выпуск 15, 2013. –С. 214–220.
10. Application of the ESR technology to the manufacturing of bimetallic HSS rolls for cold and hot strip mills /C. Gaspard, S. Bataille / Ibid.2013 P. 655-663.
11. Study of high-temperature deformation of casting Fe-26Cr-14Ni /TiC (p) composite / Xidong Hui, Zhifu Wang, Benmao Sun. – Instit. Of Materials Science, Shandong Univ. of Technology. Jinan. – 2011. – 19 № 12. – p. 64-68.
12. Cubota Naoky, Nishida Minory. Creation of composite alloys with TiN particles and their wear resistance / Met. Fac. Eng. Ehime Univers. –2012. – № 1. – p. 125-132.
13. Particulate reinforced metal matrix composite (TiC) as a weld deposited / E.I. Kivineva, D.L. Olsom, D.K. Matlock // Welding J. 2015. № 3. p. 83-92.
14. Олейниченко В.И. Электрошлаковая наплавка трубчатым электродом заготовок прокатных валков: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Киев. 2011. 21 с.
15. Шевченко В.Е. Электрошлаковая технология в производстве современных прокатных валков. Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Киев. 2011. 23 с.
16. Артемьев А.А. Разработка технологии ЭШН порошковой проволокой с упрочняющими частицами TiB<sub>2</sub>: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград. 2010. 13 с.
17. Соколов Г.Н. Формирование композиционной структуры наплавленного металла для работы в условиях термосилового воздействия и разработка технологии ЭШН прессовых штампов и инструмента: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Волгоград. 2007. 36 с.
18. Быстров В.А. Роль твёрдых частиц КМ, работающих при высокотемпературном износе / В.А. Быстров, Т.Н. Борисова // В мире научных открытий. In the world of scientific discoveries. –№ 8(56), – 2014.– С. 22-41.
19. Грекова Н.Ю. Эффективность инноваций, повышающих производительность и качество металлопродукции за счёт упрочнения сменных деталей / Н.Ю. Грекова, В.А. Быстров // Монография: «Научные изыскания в сфере социально-экономических и гуманитарных наук: Междисциплинарный подход и генезис знаний». 2017 г. КМ-0417 С. 341–359.
20. Дьяков П.К. Управление инновационными потоками металлургического предприятия / П.К. Дьяков, В.А. Быстров // В мире научных открытий. In the world of scientific discoveries. № 3.6 (51). 2014. С. 2472-2481.
21. Быстров В.А. Формирование рациональных программ управления электрошлаковым процессом упрочнения деталей новыми композиционными материалами / В.А. Быстров, Н.Ю. Грекова, О.Г. Трегубова // Вестник СибГИУ. – 2012. – № 1. –С. 60–65.