УДК 669-5:621.771:669.018.25

# УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ УПРОЧНЕНИЯ ТВЁРДЫМ СПЛАВОМ СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Быстров В.А., Борисова Т.Н., Грекова Н.Ю., Франк Е.Я.**

*ФБГОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, e-mail: bistrov39@yandex.ru*

Рассмотрено управление процессом упрочнения деталей металлургического оборудования композиционным материалом (КМ) на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН 20 с использованием электрошлаковой наплавки (ЭШН). В процессе управления наплавкой твёрдым сплавом особое внимание уделено высокотемпературной износостойкости КМ. Поскольку высокотемпературная износостойкость композиционных материалов определяется комплексом свойств твёрдых частиц, поэтому первоочередной задачей управления процессом упрочнения сменных деталей является: сохранение высоких механических, теплофизических и энергетических характеристик карбидов; и снижение растворимости твёрдых частиц в матрице КМ при наплавке. Для управления процессом ЭШН КМ разработаны управляющие воздействия, направленные на снижение степени растворимости твёрдых частиц ТН 20 в матрице, с целью повышения износостойкости упрочняемых деталей. Следовательно, были поставлены следующие задачи управления процессом упрочнения: предотвращение образования сложнолегированных структур на поверхности раздела твёрдая частица – матрица; снижение термических напряжений и деформаций, приводящих к образованию трещин и выкрашиванию твёрдых частиц при абразивном износе; повышение высокотемпературной износостойкости. Применение разработанных систем управляющих воздействий на процесс упрочнения быстроизнашивающихся деталей металлургического оборудования позволило значительно увеличить срок службы сменных деталей и повысить производительность металлургических агрегатов, что обеспечило получение определённого экономического эффекта.

**Ключевые слова: спечённый твёрдый сплав, граница раздела твёрдая частица – матрица, растворимость твёрдых частиц, релаксация напряжений**

# MANAGING THE PROCESS OF ELECTROSLAG BUILDING-UP OF HARD ALLOY THE METALLURGICAL EQUIPMENT

**Bystrov V.A., Borisova T.N., Grekova N.Yu., Frank E.Ya.**

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, e-mail: bistrov39@yandex.ru*

Considered in order to manage the process of hardening of metallurgical equipment composite material (KM) based on sintered hard alloys carbide type TN 20 using electroslag welding (ESW). In the management of hard alloy cladding special attention is paid to high-temperature durability KM. Since high temperature wear resistance of composite materials is determined by the complex properties of solid particles, therefore, a priority of the hardening process control replacement parts is: saving high mechanical, thermal and power characteristics of carbides; and decrease the solubility of solid particles in a matrix KM when surfacing. ESW management control actions are developed, KM to decrease the solubility of solid particles in a matrix of TN 20, with a view to enhancing the durability of harden able details. Therefore, the following tasks have been entrusted to manage the process of hardening: preventing the formation of complex alloyed structures on the surface of the solid section particle-matrix; reducing thermal stresses and deformations that leads to the formation of cracks and the removal of solid particles in abrasive wear; improvement of high temperature wear resistance. Application of the developed systems of control actions on the hardening process of wearing parts of metallurgical equipment has greatly increased the lifespan of spare parts and improve the performance of steel units that receive certain economic benefits provided.

**Keywords: baked section boundary carbide, solid particle-matrix, the solubility of solids, stress relaxation**

Срок службы металлургического оборудования зависит от долговечности и износостойкости быстроизнашивающихся деталей и узлов, определяющих работу крупных металлургических агрегатов. Поскольку металлургическое производство относится к высокотемпературному процессу, где многие детали, соприкасаясь с раскалённым материалом, испытывают высокотемпературный абразивный износ, следовательно, работоспособность быстроизнашивающихся сменных деталей металлургических агрегатов определяется их способностью сопротивляться воздействию высокотемпературного абразивного износа [1].

Для предотвращения износа сменные детали металлургических агрегатов необходимо упрочнять композиционными материалами (КМ) на основе жаропрочных карбидных частиц, например релитом ($WC+W_2C$), но релит интенсивно растворяется в сплаве-связке на основе железа, что побудило исследователей искать новые безвольфрамовые КМ. Поэтому совершенствование управления процессом упрочнения деталей металлургического оборудования новыми КМ на основе спечённых твёрдых сплавов типа ТН 20 (монитикар – $TiC-Mo_2C-Ni$, или как ещё обозначают, (Ti,Mo)C-Ni-Mo), является весьма актуальной задачей [1, 2].

Выбор карбидов для КМ осуществляли на основе анализа их свойств, во-первых – предельная растворимость карбидов в расплавах; во-вторых – механические, теплофизические и энергетические характеристики карбидов при воздействии высоких температур; в-третьих – разупрочнение карбидов металлов при повышенных температурах. Жаропрочность КМ определяется структурными факторами, состоянием поверхности раздела, энергией активации и силами межатомной связи в твёрдых растворах. К структурным факторам относятся состояние зёрен, блоков и их границ, наличие вторичных фаз, искажения кристаллической решётки и плотность дислокаций. Энергия активации и силы межатомных связей определяют уровни энергии в кристаллической решётке и связанные с ними $T_{пл.}$ Me′C, константы диффузии и самодиффузии и характеристические температуры разупрочнения. Установлено, что если коэффициент находится на уровне $10^{-14}…10^{-13}$ см$^2$/с, то сплав оказывает достаточное сопротивление пластической деформации, вызванной нагревом. Температура разупрочнения сплавов зависит от температуры эвтектик, образующихся при реакции Me′C+ Me″, которые не зависят от температуры эвтектических реакций в системах Me″ C–C. Таким образом, чем выше температура плавления сплава-связки, тем больше должна быть температура солидуса сплава и, следовательно, выше жаропрочность КМ. Сопоставляя весь комплекс свойств высших карбидов, установили, что наилучшими свойствами для КМ обладает карбид титана, составляющий основу ТН 20. Выбор спечённого твёрдого сплава ТН 20 в качестве армирующих частиц КМ обусловлен его уникальными свойствами: высокая твёрдость 86–92 HRA; высокая микротвердость $H_{μ}$ = 19,5–22,0 ГПа; величина модуля упругости составляет 445 ГПа; высокий предел прочности при сжатии до $σ_{сж}$ = 6,0 ГПа, с достаточной прочностью на изгиб $σ_{изг.}$ = 1,2–2,5 ГПа и на растяжение $σ_{в}$ = 0,5$σ_{изг.}$. И самое благоприятное свойство среди известных карбидов – высокая ударная вязкость 0,8–1,2 МДж/м$^2$ [1, 3–5]. Длительное сохранение указанных свойств при повышенных температурах является основной характеристикой спечённых твёрдых сплавов ТН 20 при высокотемпературном абразивном износе металлургического оборудования, обеспечивая высокую жаропрочность и повышение срока службы деталей.

Структура ТН 20 после спекания приобретает «кольцевую структуру» (рис. 1), центральная часть – TiC, средняя зона – твёрдый раствор (Ti,Mo)C с небольшим количеством никеля и внешняя оболочка – никель-молибденовый твёрдый раствор [6–8]. Такая структура, благодаря внешней никелевой оболочке, снизила реакционную способность ТН 20, улучшила смачиваемость металлами группы железа и повысила термостойкость КМ.

Исследования показали, что наиболее перспективным оказался электрошлаковый способ упрочнения сменных деталей разработанным КМ, поскольку позволяет управлять процессом наплавки за счёт введения твёрдых частиц в зону более низких температур, причём дозированными порциями, которые вызывает ускорение кристаллизации. Для управления процессами электрошлаковой наплавки (ЭШН), которые соответствуют поставленной задаче упрочнения быстроизнашивающихся деталей путём повышения износостойкости и жаропрочности наплавленного КМ, необходимо было решить ряд задач [1, 6–8].

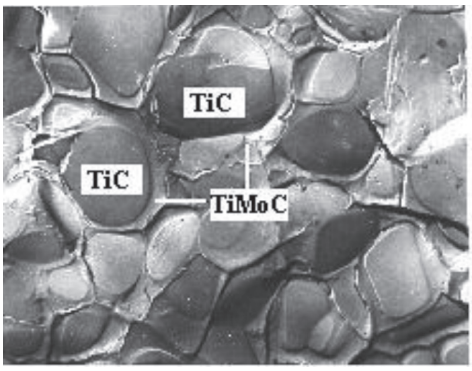


*Рис. 1. (X 15200). «Кольцевая структура» спечённого твёрдого сплава ТН 20*

Во-первых, особую трудность при формировании рациональных программ управления процессом ЭШН КМ вызывает отсутствие не только стандартных программ управления для различных ситуаций, но и сама технология упрочнения постоянно видоизменяется. Во-вторых, отсутствуют достоверные сведения о растворимости твёрдых частиц в сплаве-связке, определяющие жаропрочность и износостойкость КМ. В-третьих, недостаточно изучена на основе дислокационного и энергетического анализа морфология образования поверхности раздела ТН 20 – матрица. Поэтому в работе рассматривается разработка комплексной программы управления процессом упрочнения деталей на основе информаций, полученных авторами в своих исследованиях, с одновременным совершенствованием способа ЭШН [6–8].

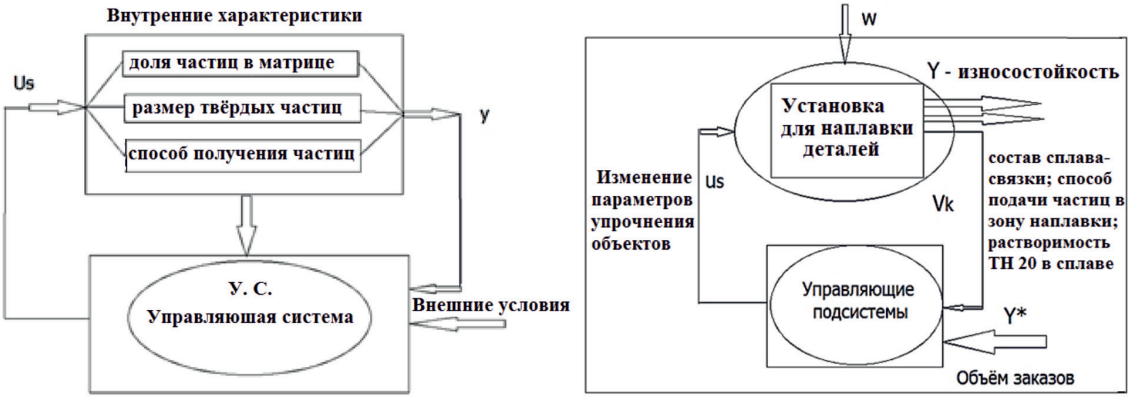


*Рис. 2. Схема управляющей системы объекта (УС) и системы управления объектом (СУ)*

Для управления процессами упрочнения деталей металлургического оборудования с использованием ЭШН КМ в работе разработаны управляющие воздействия, позволяющие снизить степень ошибки эксперимента в процесс наплавки и регулировать растворимость твёрдых частиц с целью повышения износостойкости упрочняемых деталей. С этой целью были поставлены и решены следующие задачи управления упрочнением сменных деталей: снижение растворимости твёрдых частиц в матрице КМ; предотвращение образования сложнолегированных структур на поверхности раздела твёрдая частица – матрица; снижение термических напряжений и деформаций, приводящих к образованию сколов и выкрашиванию твёрдых частиц при абразивном износе.

Чтобы построить схему Системы Управления (СУ) объектом исследования, необходимо ответить на ряд вопросов, характеризующих объект [6–8]:

1. Что есть объект управления процессом упрочнения твёрдым сплавом оборудования?

– выходное воздействие → износостойкость упрочняемого оборудования, повышение срока службы быстроизнашивающихся деталей металлургического оборудования?

– управляющее воздействие → доля твёрдых частиц в матрице; размер и способ получения твёрдых частиц, растворимость спечённого твёрдого сплава ТН 20 в матрице?

2. Что есть управляющая подсистема → установка для наплавки деталей, изменение параметров ЭШН упрочнения объектов, зона введения и масса твёрдых частиц?

3. Что есть внешние воздействия и на что (Орган Управления ОУ) или УО они воздействуют: управление термодинамической и кинетической совместимостью компонентов КМ?

4. Какие свойства объекта исследования (состав сплава-связки, способ подачи ТН 20 в зону наплавки, растворимость частиц в сплаве)?

На основе известных методов и алгоритмов был разработан и внедрён в практику вариант управления растворимостью твёрдых частиц в матрице КМ при ЭШН [1, 9–12], что, в свою очередь, потребовало реализации и внедрения трёх основных компонент:

1) используя управляющее воздействие – теорию термодинамической и кинетической совместимости твёрдых частиц и сплава-связки – разработать новые способы получения КМ на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН 20 [12–14];

2) используя управляющее воздействие – исследование процессов на поверхности раздела – регулировать состав сплава-связки, способ подачи частиц в зону наплавки; и управляя растворимостью частиц в сплаве, повысить износостойкость новых КМ [15–17];

3) используя управляющее воздействие – регулирование остаточных термических напряжений на границе раздела фаз – разработать способы предотвращения образования сложнолегированных структур, вызывающих охрупчивание и приводящих к росту остаточных термических деформаций [1, 6–8].

Ответы на эти вопросы частично отображены на рис. 2.

Для оценки сформированных вариантов был использован метод постулируемых принципов [8, 13, 15], в соответствии с которым вводится квадратичный штраф отклонений от наилучшего значения:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{x_i - x_i^*}{x_i^*} \right)^2, \qquad (1)$$

где $x_i^*$ – наилучшая оценка по $i$-му критерию; $x_i$ – фактическая оценка по $i$-му критерию.

При этом критерии ранжируются по важности при соблюдении условия

$$\sum_{i=1}^{N} w_i = 1, \qquad (2)$$

где $w_i$ – оценка важности $i$-того критерия.

После этого определяется качество каждого варианта по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^{N} w_i U_i. \qquad (3)$$

Следовательно, выбор КМ одновременно зависит от управляющих воздействий, влияющих на зону сплавления твёрдая частица – матрица, и определяющих износостойкость КМ. Таким образом, его можно получить при условии определения всех прочих управлений.

Решение этой задачи осуществляется: во-первых, подбором нейтрального состава сплава-связки с минимальной растворимостью твёрдых частиц в матрице на основе теории кинетической совместимости твёрдых частиц; во-вторых, нанесением барьерного покрытия путём борирования твёрдых частиц [14]; в-третьих, исследованием возможности использования карбида молибдена $Mo_2C$ в качестве защитного покрытия на твёрдые частицы.

При избыточном содержании бора в сплаве-связке ПГ–СР3 (колмоной) на поверхности твёрдых частиц ТН 20 осаждается фаза TiCB – карбоборид титана с образованием межфазной прослойки. На рис. 3 приведена микроструктура КМ ТН 20 + колмоной, который содержит 3,2% бора. Образующаяся прослойка борида титана, толщина которой определяется скоростью диффузии бора в его решётке, снижает растворимость твёрдых частиц и препятствует образованию сложнолегированных структур на поверхности раздела ТН 20 – матрица.

Условия разупрочнения и предельная растворимость ТН 20 в матрице приведены в работах [6, 7, 16–17], где даётся следующее определение: «Поверхность раздела представляет собой область с существенно изменённым химическим составом, в которой осуществляется связь между составляющими композиционной структуры и обеспечивается передача нагрузки между ними». Образование и протяжённость поверхности раздела зависит от массы подаваемых частиц и времени пребывания твёрдых частиц в расплаве матрицы.

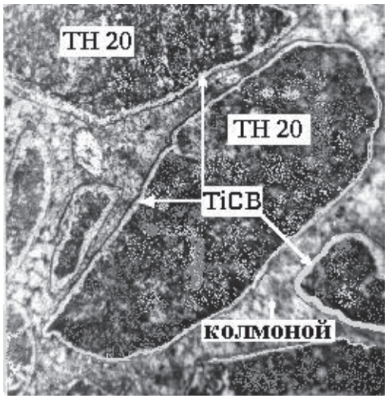


*Рис. 3. × 120. Микроструктура КМ с осаждённым TiCB на поверхности ТН 20*

Для предотвращения интенсивного растворения критическая величина объёмной доли твёрдых частиц в матрице КМ должна быть в пределах 42–44%. Исследования показали (табл. 1), что разработанные КМ имеют объёмную долю твёрдых частиц в матрице выше критических величин (примерно 54–57%), что свело до минимума образование сложнолегированных структур и выделение новых фаз на поверхности раздела [1, 6–8].

Повышение объёмной доли твёрдых частиц в матрице КМ способствует росту высокотемпературной прочности (табл. 2) за счёт снятия внутренних напряжений и выделения избыточных дисперсных фаз на поверхности раздела из пересыщенного твёрдого раствора при кристаллизации КМ. Это, безусловно, сказалось на повышении износостойкости при высокотемпературном абразивном износе (рис. 4), и увеличении энергоёмкости $E_{КМ}$ (формула (4)).

**Таблица 1**

Результаты стереологического анализа композиционного материала

| Сплав-связка | Метод получения твёрдых частиц ТН 20 | Стереометрические параметры исследуемых КМ* | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Исходная фракция, мм | $\overline{L}_K$, мкм | $\overline{T}_K$, мкм | $\overline{V}_K$, % | $\overline{S}_K$, мм$^{-1}$ |
| Колмоной 55Х16Н75С3Р3 | Дроблёные | 1,5÷3,0 | 2184 | 1872 | 53,8 | 0,5 |
| | Сферические | 0,4÷0,8 | 614 | 377 | 57,7 | 3,4 |
| | С покрытием | 0,8÷1,2 | 967 | 897 | 53,4 | 0,98 |

Примечание. * $\overline{L}_K$ – средний линейный размер твёрдых частиц; $T_K$ – среднее линейное расстояние между карбидами; $\overline{V}_K$ – средняя объёмная доля карбидов в КМ; $\hat{S}_M$ – удельная поверхность границ карбидов в матрице.

**Таблица 2**

Высокотемпературная прочность материалов КМ на растяжение

| Компоненты композиционного материала | Предел прочности $\sigma_в$ (МПа) при температурах испытания ($T_{исп}$ °С) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| ПГ-СР3 – сплав-связка | 338 | 345 | 360 | 404 | 420 | 376 | 320 | 276 | 212 | 201 |
| ТН 20 – твёрдый сплав | 476 | 512 | 543 | 578 | 606 | 572 | 505 | 409 | 355 | 317 |
| КМ – ТН 20 + ПГ-СР3 | 375 | 383 | 418 | 459 | 482 | 472 | 414 | 356 | 309 | 254 |

Кроме того, с повышением объёмной доли твёрдых частиц в матрице КМ проявился «теневой эффект», описанный в работе [1, 6] и наблюдаемый при испытаниях КМ на абразивный износ, что положительно сказалось на увеличении энергоёмкости $E_{КМ}$ (формула (4)).

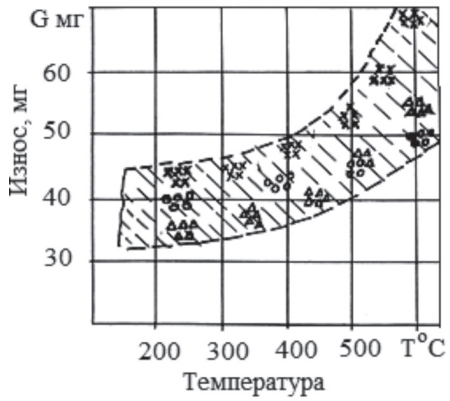


*Рис. 4. Влияние температуры на износ КМ: ТН 20 + колмоной; о – фракция 0,6...0,8 мм; х – фракция 1...1,2 мм; Δ – фракция 1,6...1,8 мм*

Конечной стадией управления процессом упрочнения сменных деталей металлургического оборудования является регулирование энергоёмкости $E_{КМ}$, которая определяется суммарной величиной энергии, поглощаемой КМ при взаимодействии с абразивными частицами в процессе изнашивания:

$$E_{КМ} = E_В + E_{тр} + E_{рк} + E_{пд} + E_{мп} + E_{вн}; \quad (4)$$

1. $E_В$ – энергия вдавливания, зависит от микротвердости ТН 20 и абразива:

$$E_В = 2\pi H_V \Delta h^2 \cdot r, \quad (5)$$

где $H_V$ – микротвердость ТН 20, Гпа; $\Delta h$ – глубина вдавливания абразива в металл, мм; r – радиус абразивной частицы, мм.

2. $E_{тр}$ – энергия зарождения и развития трещины, зависит от пластичности матрицы:

$$E_{тр} = \frac{n^2 b^2 E}{4\pi(1-\mu)\ell n(4R/\ell)} + 2E_n l - \frac{\pi(1-\mu)\cdot l^2\sigma^2}{8E} - \sigma \cdot n \cdot b \cdot l, \quad (6)$$

где $l = 2\pi \cdot a \cdot r/360$ – протяжённость поля напряжений от вершины трещины; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости ТН20; $E_п$ – эффективная поверхностная энергия развития трещины; R – радиус абразивной частицы; ℓ – расстояние между частицами, мм; σ – напряжение, приводящее к образованию и развитию трещины (данные определялись в процессе эксперимента);

3. $E_{рк}$ – энергия разрушения карбидов, зависит от свойств ТН 20 (см. стр. 2):

$$E_{рк} = L_{пл} - \int_{T_{из}}^{T_{пл}} \Delta C_p dT - \int_{0}^{T_{из}} C_p dT, \quad (7)$$

где $L_{пл}$ – скрытая теплота плавления при температуре изнашивания; $T_{из}$, $T_{пл}$ – температура, соответственно, износа и плавления, °С; $\Delta C_p$ – разность удельных теплоёмкостей в жидкости и при температуре изнашивания (данные определялись в процессе эксперимента).

4. $E_{пд}$ – энергия плотности дислокаций оценивается выражением

$$E_{пд} = E_{пл} \cdot V_p \cdot \int_0^{l_p} f \cdot (l_p) dl_p + E_к \cdot V_к \cdot \int_0^{l_к} \varphi \cdot (l_к) dl_к, \quad (8)$$

где $E_{пд}$, $E_к$ – энергия плотности дислокаций соответственно в растворе матрицы и в ТН 20; $V_p$, $V_к$ – объём соответственно матрицы и ТН 20 (табл. 1); f, φ – плотность дислокаций соответственно матрицы и ТН 20; $l_p$, $l_к$ – протяжённость участка соответственно матрицы и ТН 20 (данные определялись в процессе эксперимента).

Плотность дислокаций, образующаяся при изнашивании КМ, определялась отдельно в матрице и ТН 20 по формуле $\rho = 0{,}2\ \beta^2 \cdot 10^{11}$. Расчёт прироста плотности дислокаций в каждой из фаз производится по разности между величиной плотности дислокаций на рабочей поверхности до и после изнашивания по данным микроструктурного анализа [6, 7, 14].

5. $E_{мп}$ – энергия мартенситных превращений находится по формуле

$$E_{м.п} = E_м \cdot V_м \cdot \int_0^{\ell_\sigma} \psi(\ell_{\Delta м})\, d\ell_{\Delta м}, \qquad (9)$$

где $\ell_{\Delta м}$ – глубина слоя, претерпевшего мартенситные превращения, измерялась с помощью металлографического анализа структуры КМ, мм.

6. $E_{вн}$ – остаточные внутренние напряжения находятся по формуле

$$E_{в.н} = \left[\left(\frac{1-2\mu}{6E}\right)\right] \cdot (3\sigma)^2 \cdot V_\sigma \cdot \int_0^{\ell_\sigma} \vartheta(\ell_{\Delta\sigma})\, d\ell_{\Delta\sigma}, \quad (10)$$

где σ – напряжения в единичном объёме; ϑ – коэффициент сжимаемости материала матрицы.

Вычислив среднее значение изменений межплоскостного расстояния $\Delta\ell/\ell$, среднюю величину микронапряжений σ можно определить из соотношения $\sigma = E \cdot \Delta\ell/\ell$ или через коэффициент сжимаемости материала $\vartheta / \sigma = 3\Delta\ell / \vartheta \cdot \ell$ [4–6].

Подробный расчёт составляющих $E_{КМ}$ приведён в работах [6–8]. Величина износа должна быть тем меньше, чем больше энергии может поглотить КМ, не разрушаясь, и чем меньше величина энергии разрушения абразивного тела $E_А$. В случае когда КМ может поглотить энергии больше того количества, которое абразивное тело передаёт сплаву, т.е. когда $E_А < E_{КМ}$, износ за данный цикл происходить не будет. Главная роль в увеличении энергии, затрачиваемой на разрушение, принадлежит твёрдым частицам. С ростом их количества возрастает твёрдость КМ, соответственно повышаются затраты энергии на вдавливание абразива $E_В$. Увеличение количества твёрдых частиц в КМ сопровождается повышением степени равномерности распределения дислокаций в изнашиваемом объёме, при этом будут возрастать энергии $E_{ПД}$ и $E_В$. Повышение износостойкости КМ с увеличением количества твёрдых частиц связано с их способностью к предотвращению износа матрицы, вследствие полного или частичного разрушения абразивов при столкновении с карбидами.

## Заключение

Регулируя процессы, происходящие на поверхности раздела ТН 20 – матрица за счёт создания барьерного покрытия, используя методы борирования и нанесения покрытия $Mo_2C$ на спечённые твёрдые частицы карбида титана, а также управляя процессом нагрева и растворения ТН 20, подавая их в зону наплавки определёнными порциями, что приводит к локальной кристаллизации сплава, удалось достигнуть повышения прочности сцепления твёрдая частица – матрица и, таким образом, повысить жаропрочность и износостойкость разработанных КМ на основе ТН 20. Управляющие воздействия на процесс упрочнения сменных деталей позволили продлить срок их службы в 3–4 раза и повысить производительность металлургических агрегатов на 2–3 %, что обеспечило получение экономического эффекта на меткомбинате 16 млн руб/год.

## Список литературы


1. Verevkin V.I. Electroslag technology of strengthening metallurgical equipment details with composite materials / V.I. Verevkin, V.A. Bystrov, I.F. Selyanin // Izv. Institute of higher education. Iron and steel industry. – 2005. – № 6. – P. 28–32.

2. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2010. – 512 с.

3. Dvorak G. Micromechanics of Composite Materials / G. Dvorak. – Springer, 2013. – 442 p.

4. Aboudi J. Micromechanics of Composite Materials / J. Aboudi, S. Arnold, B. Bednarcyk. – Elsevier, 2013. – 984 p.

5. Brebbia C.A. Materials Characterizations VI: Computational Methods and Experiments / C.A. Brebbia, A.Klemm. – M.: WIT Press. Glasgow Caledonian University, 2013. – 364 p.

6. Быстров В.А. Роль твёрдых частиц КМ, работающих при высокотемпературном износе / В.А. Быстров, Т.Н. Борисова // В мире научных открытий. – 2014. – № 8(56). – С. 22–41.

7. Быстров В.А. Термодинамическая совместимость твёрдых частиц с матрицей КМ / В.А. Быстров, О.Г. Трегубова // Доклады АН ВШ. – 2015. – № 4. – С. 255–267.

8. Грекова Н.Ю. Эффективность инноваций, повышающих производительность и качество металлопродукции за счёт упрочнения сменных деталей / Н.Ю. Грекова, В.А. Быстров // Научные изыскания в сфере социально-экономических и гуманитарных наук: Междисциплинарный подход и генезис знаний: монография. – Самара: ООО «Офорт», ООО «Поволжская научная корпорация», 2017. – С. 341–359.

9. Nickel alloy + TiC composite lagers made by oscillating electron beam./ M. Kozlowski, J. Senkara // ASM Int. Eur.: Conference Weld and Join Science and Technology: Book Proc. Brussels, 2011. – P. 425–431.

10. 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. – T. 19, № 12. – P. 64–68.

11. 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.

12. 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.

13. Большаков В.И. Асимптотические методы расчёта композиционных материалов с учётом внутренней структуры: изд. 5 / В.И. Большаков, И.В. Андрианов. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 197 с.

14. Артемьев А.А. Разработка технологии ЭШН порошковой проволокой с упрочняющими частицами $TiB_2$: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Волгоград, 2010. – 13 с.

15. Туманов А.В. Исследование кинетики смачивания TiC и TiNC расплавами интерметаллидов никеля / А.В. Туманов, Б.С. Митин, В.С. Панов // Физическая химия. – 2012. – Т. 54, № 6. – С. 1434–1437.

16. Стойкость неметаллических материалов в расплавах: справочник / А.Д. Панасюк, В.С. Фоменко, Г.Г. Глебова. – Киев: Наук. думка, 1986. – 352 с.

17. Быстров В.А. Борирование твёрдых частиц КМ / В.А. Быстров, Т.Н. Борисова // In the World of Scientific Discoveries. В мире научных открытий. – 2015. – № 2(59). – С. 22–42.