

УДК 621.793.620.172

Влияние стабилизации структуры наноразмерными фазами на свойства жаропрочного наплавленного металла

© 2009 Г.Н.Соколов, В.И.Лысак, И.В.Зорин

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: lysak@vstu.ru; kewa991@yandex.ru
Поступила в редакцию

Исследована структура, морфология, элементный состав и высокотемпературная твердость жаропрочных сплавов на основе железа, никеля и алюминид никеля Ni_3Al , полученных в процессе электрошлаковой наплавки. Установлено, что наплавленный металл имеет структуру естественного композита, матрица которого стабилизирована субмикродисперсными выделениями избыточных фаз. Наличие в структуре металла наноразмерных частиц интерметаллидов различного происхождения способствует повышению эксплуатационных свойств жаропрочных покрытий при циклическом термосиловом воздействии в интервале температур 700-1100°C.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, алюминид никеля, естественный композит, интерметаллиды, карбиды, наноразмерные частицы, высокотемпературная твердость.

The structure, morphology, elemental composition, and high-temperature hardness of heat-resistant Fe-, Ni-, and Ni_3Al -based weld alloys produced by electroslag surfacing have been investigated. The weld metal is found to have a structure of natural composite, the matrix of which is stabilized with fine precipitations of excess phases. The presence of nanosize intermetallic particles in the weld metals makes better the operating properties of heat-resistant coatings under cycle thermo-force action in the range of 700-1100°C.

Keywords: electroslag surfacing, nickel aluminate, natural composite, intermetallics, carbides, high-temperature hardness.

Введение

Наряду с известными металлургическими процессами [1-3], электрошлаковая наплавка (ЭШН) [4,5] обеспечивает направленную кристаллизацию жаропрочных сплавов и формирование в них структуры естественного композита, что позволяет целенаправленно управлять свойствами наплавленного металла, определяющимися его фазовым составом, структурой и дисперсностью. Для наплавки деталей машин, металлургического инструмента и

других изделий ответственного назначения, в зависимости от температуры, при которой они работают, используют различные типы жаропрочных сплавов (рис.1) [6]. Дисперсными упрочняющими фазами в них служат карбиды тугоплавких металлов, нитриды, интерметаллиды и другие химические соединения, стойкие к растворению и коагуляции под действием высоких температур и напряжений. Известно, что содержание таких фаз, их дисперсность, морфология и распределение в сплавах одного и того же состава, имеющих разное металлургическое

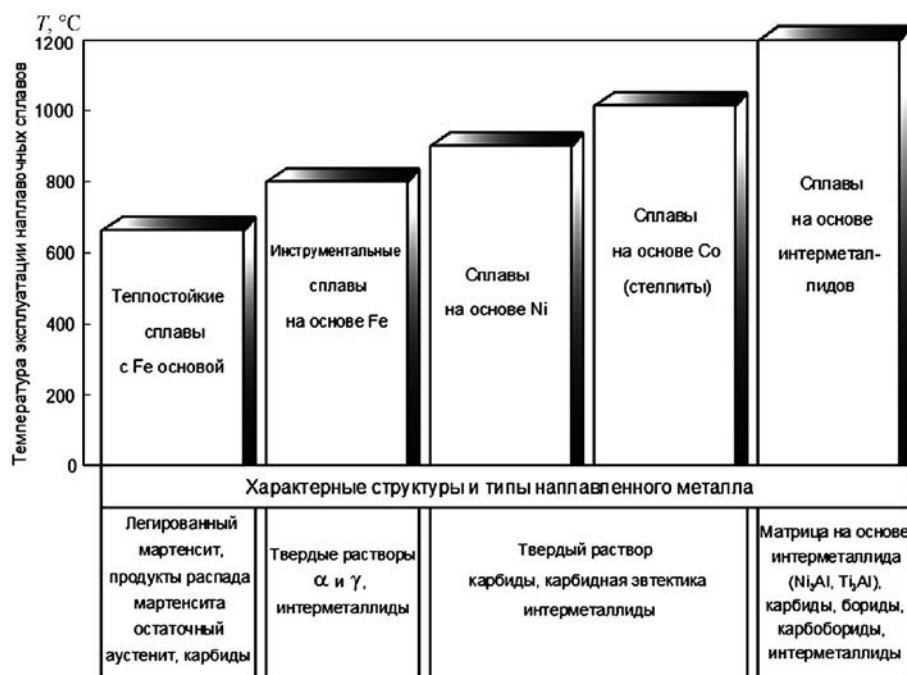


Рис.1. Типы и структура сплавов для наплавки инструментов для деформирования горячего металла.

происхождение, существенно различаются, что сказывается на технологических и эксплуатационных свойствах наплавленного металла.

Целью данной работы было в выявлении влияния композиционной структуры сплавов с матрицами на основе Fe, Ni и алюминиды никеля Ni_3Al , содержащих наноразмерные выделения вторых фаз, на высокотемпературные свойства наплавленного ЭШН металла.

Материалы и методика эксперимента

Исследования выполняли с использованием разработанных в ВолгГТУ наплавочных порошковых проволок и технологии ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым электродом, предусматривающей двухконтурную схему электропитания постоянным током [5]. Наплавку экспериментальных образцов производили на сталь 20 с использованием флюса АНФ-6, защищая поверхность шлаковой ванны аргоном. Исследовали три типа наплавленного металла на основе железа (200X28M7H2), никеля (250X22H66M4B2) и алюминиды никеля Ni_3Al (50X20H65B3M3Ю6Ц), предназначенные для работы в интервале температур 650-700, 750-950 и 950-1100°C соответственно.

Структуру, морфологию и элементный состав наплавленного металла изучали с помощью оптической (цифровой микроскоп Axiovert 40 MAT) и

электронной микроскопии (растровый масс-спектрометр с автоэмиссионным катодом JEOL JSM 6700F, сканирующий зондовый микроскоп Solver Pro). Содержание и распределение легирующих элементов в структурных составляющих определяли при сканировании шлифов в локальном (1-3 μm^3) объеме металла на глубине до 2 μm от поверхности в режиме использования сигналов вторичных электронов. Фазовый состав наплавленного металла определяли методом рентгеноструктурного анализа в медном излучении на дифрактометре ДРОН-3М. Микрорентгеноспектральные исследования производили на анализаторе Самеса MS-46. Сопротивление наплавленного металла деформации оценивали по величине высокотемпературной твердости, которую определяли на оборудованном электропечью приборе ТШ-2 с использованием в качестве индентора твердосплавного шарика диаметром 5 мм при нагрузке 7,35 кН и выдержке под нагрузкой в течение 10 с. Металлографические исследования проводились на шлифах, в которых наплавленный металл имел поперечное и продольное расположение кристаллитов.

Результаты и обсуждение

Установлено, что структура наплавленного ЭШН металла с матрицей на основе железа состоит из насыщенного молибденом α -твердого раствора

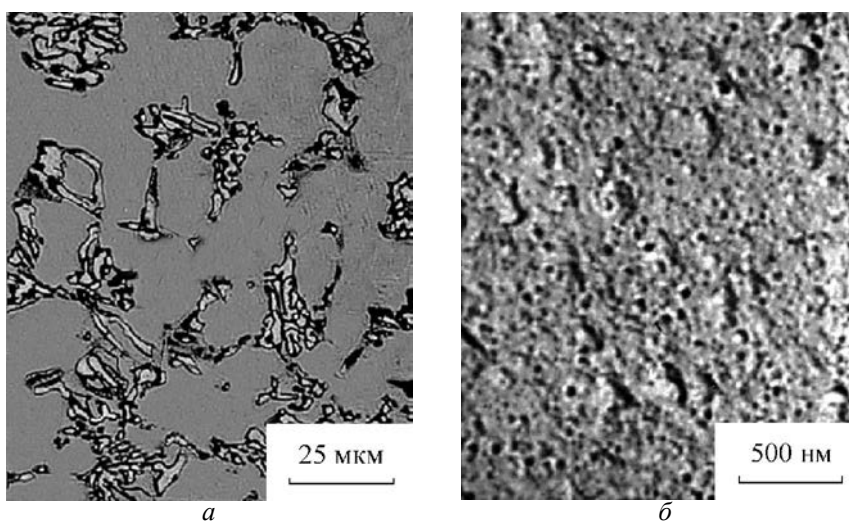


Рис.2. Структура наплавленного металла 200X28M7H2: *a* — общий вид структуры, $\times 400$; *b* — твердый раствор с интерметаллидами Fe-Cr-Mo, $\times 20000$.

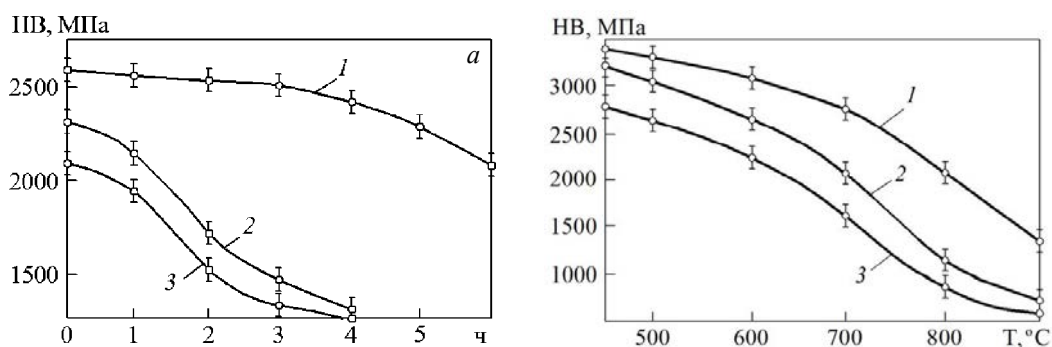


Рис.3. Зависимость горячей твердости *HV* от времени выдержки при температуре 700°C (*a*) и от температуры испытаний (*b*): 1 — наплавленный металл 200X28M7H2; 2 — сталь 30X2B8FC; 3 — сталь 40X2B5FM.

(микротвердость 3800-3900 МПа), содержащего субдисперсные выделения α -фазы $\text{Fe}_{12}\text{Cr}_{36}\text{Mo}_{10}$, сходной по кинетике образования с σ -фазой, карбидов $(\text{Mo}, \text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ (микротвердость 8000-10000 МПа) и 20-30 об.% карбидной эвтектики (микротвердость 7300-7500 МПа), равномерно распределенной по границам кристаллитов, состоящих из карбидов $(\text{Mo}, \text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ и MoC (рис.2). При этом отмечена сравнительно невысокая растворимость молибдена в карбидах Me_7C_3 и Me_{23}C_6 . Так как упрочнение наплавленного металла обеспечивается за счет формирования в пластичном твердом растворе каркаса из карбидов и образования наноразмерных (80-100 нм) интерметаллидов FeCrMo, то твердость наплавленного металла после 5-6 ч выдержки при 700°C снижается незначительно (рис.3а), в то время как Cr-W теплостойкие инструментальные стали,

применяемые для изготовления штампов горячего деформирования, теряют ее уже после 1,5-2 ч выдержки. По показателю горячей твердости в широком интервале температур экспериментальный сплав системы Fe-Cr-Mo-C также существенно превосходит известные инструментальные стали (рис.3б).

Структура наплавленного металла на основе Ni состоит из легированного твердого раствора на основе Ni и карбидов NbC, Mo_2C , а также равномерно распределенной карбидной эвтектики с микротвердостью 4000 МПа (рис.4). Субдисперсные карбиды ниобия выделяются преимущественно на дефектах кристаллической решетки Cr-Ni γ -твердого раствора, способствуя его упрочнению и относительно равномерному распределению Si и карбидной эвтектики (рис.5). Молибден также равномерно

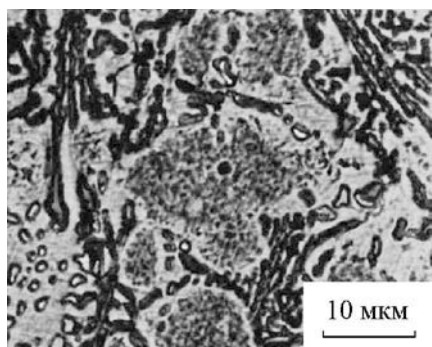


Рис.4. Микроструктура наплавленного металла 250X22H66M42B с содержанием 1,82 масс.% Nb, $\times 600$.

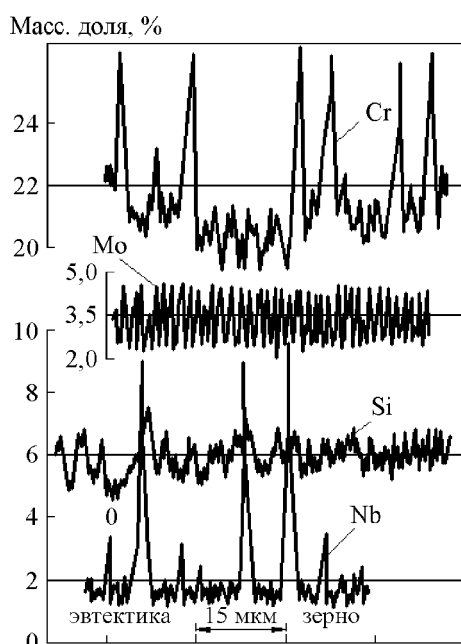


Рис.5. Распределение легирующих элементов в наплавленном металле 250X22H66M42B.

распределен в наплавленном металле, что подтверждает его сильную химическую связь с никелем и является одной из причин более высокой, чем у никелевых сплавов с вольфрамом, жаропрочности сплавов с молибденом. Данные по горячей твердости наплавленного металла сплавов различного типа свидетельствуют о высоком сопротивлении Ni-Mo сплавов термосиловому воздействию при температурах до 900°C (рис.6).

Металлографическими исследованиями наплавленного металла на основе алюминиды никеля выявлено, что он имеет сложное гетерофазное строение. Его структура (рис.7) состоит преимущественно из дендритов легированного алюминиды γ' -Ni₃Al с микротвердостью 2800-3200 МПа (рис.8а). Дендриты

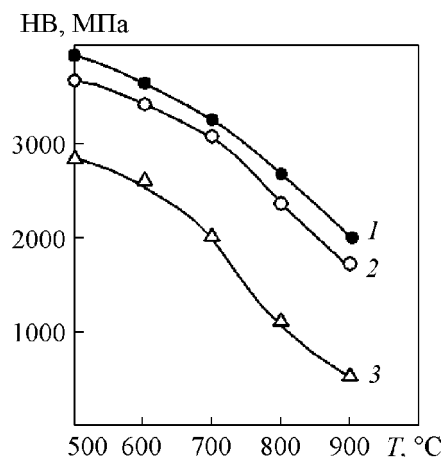


Рис.6. Влияние температуры испытаний на высокотемпературную твердость HV наплавленного металла: 1 — Хастеллой-С; 2 — 250X22H66M42B; 3 — 30X2B8FC.

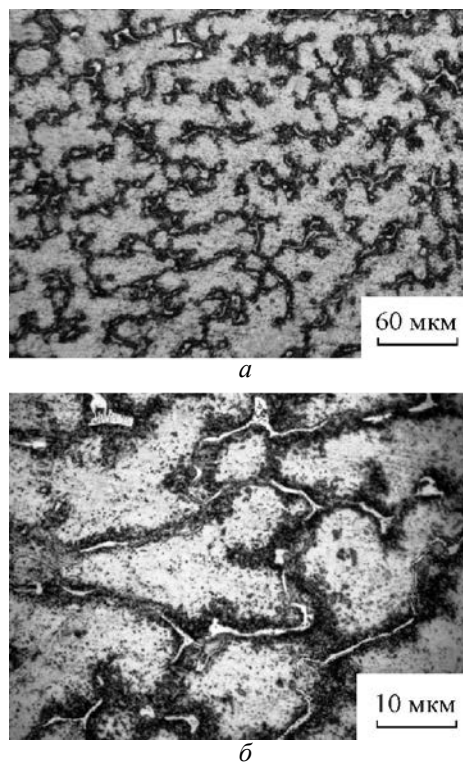


Рис.7. Структуры наплавленного металла на основе алюминиды никеля: а — общий вид, $\times 200$; б — характерные участки поверхностного электронного зондирования, $\times 1000$.

содержат неупорядоченный γ -твердый раствор на основе Ni, легированный хромом, вольфрамом, молибденом, танталом, титаном и железом, дисперсные вторичные $\gamma'_{вт}$ -фазы, интерметаллиды CrNiMoTiZr (κ -фаза) (рис.8б) и тугоплавкие карбиды Ta₂C, WC, Mo₂C. В междендритном пространстве

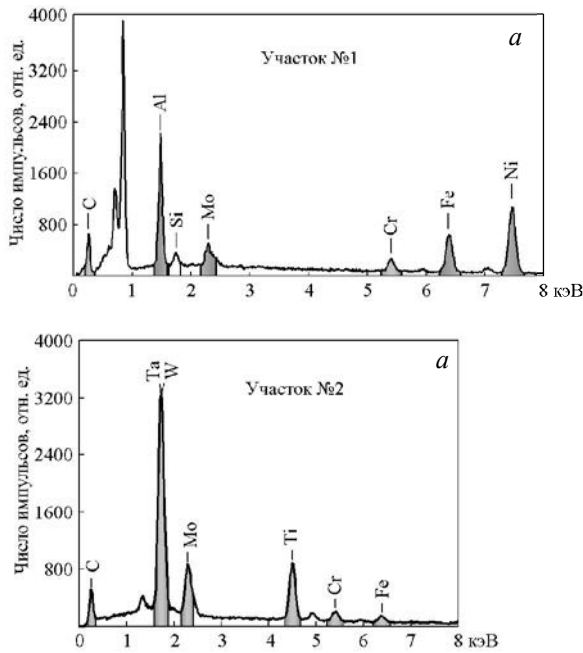


Рис.8. Электрограммы элементного состава металла в локальном (2-3 мкм) участке первичного дендрита γ' -Ni₃Al (а) и на участке между дендритами (б).

расположены алюминиды $\gamma'_{эв}$ эвтектического происхождения неправильной формы, в которых встречаются выделения к-фазы с микротвердостью 4600-4800 МПа. Состоящая из карбидов Cr₇C₃ и Mo₂C карбидная эвтектика и $\gamma'_{вт}$ -фаза с микротвердостью 5500-5700 МПа равномерно распределены между первичными γ' кристаллитами. Суммарное содержание фаз γ' -Ni₃Al различного происхождения в наплавленном металле составляет 85-90 об.%.
Состав поверхности наплавленного металла характеризуется достаточно большой химической микронеоднородностью по содержанию Ni и Al, что влияет на образование γ' алюминида никеля. Их содержание наиболее близко к стехиометрическому в областях первичных кристаллитов, расположенных в пересыщенных никелем осевых объемах, а также в пространстве между ними.

Сканирование поверхности шлифа в области сечения дендрита γ' выявило равномерно распределенные в $\gamma'+\gamma$ твердом растворе наноразмерные частицы $\gamma'_{вт}$, обеспечивающие диспергирование структуры металла (рис.9).

Очевидно, что повышенная жаропрочность наплавленного металла сплава на основе алюминида никеля может объясняться одновременным действием двух механизмов структурного упрочнения. Первый определяется наличием стабильной композиционной структуры, состоящей из прочного

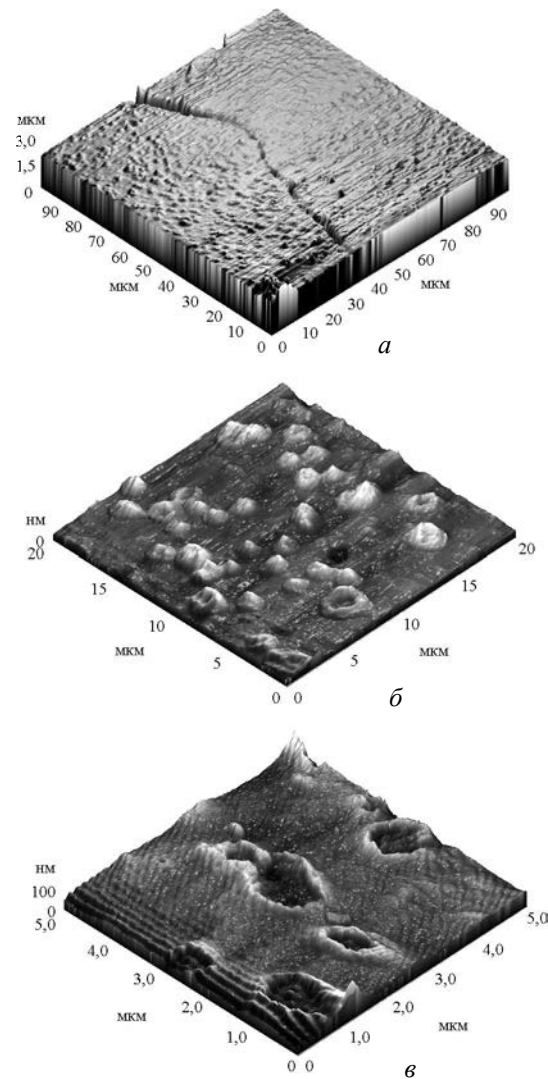


Рис.9. Трехмерное изображение поверхности наплавленного металла в сечении дендрита γ' -Ni₃Al.

каркаса $\gamma'_{вт}$ -фазы и карбидной эвтектики в пластичной матрицей, в виде легированного тугоплавкими элементами дендритообразного твердого раствора, представляющего собой эвтектику на основе $\gamma'+\gamma$. Второй механизм связан с наличием в сплаве достаточно большой объемной доли термодинамически устойчивых наночастиц $\gamma'_{вт}$ -фазы, а также микрочастиц к-фазы, имеющих стабильный размер, морфологию и распределение.

Сравнительный анализ результатов испытаний наплавленного металла сплавов различного структурного класса показал, что ЭШН сплав на основе γ' -Ni₃Al обладает повышенным сопротивлением пластической деформации в интервале температур 950-1100°C (рис.10).

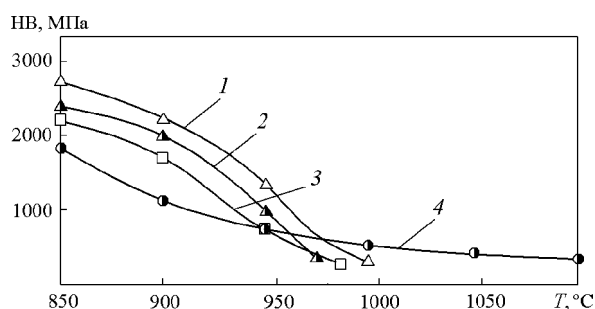


Рис. 10. Изменение твердости НВ наплавленного металла при высоких температурах: 1 — Стеллит 160X28K60B8H; 2 — Хастеллой-С (03X15H60M16B4K4); 3 — 250X22H66M4B2; 4 — наплавленный металл на основе γ' -Ni₃Al.

Промышленные испытания показали, что жаропрочные сплавы, наплавленные на различный металлургический инструмент и штампы, работающие при температурах 700-1100°C, в 2-2,5 раза повышают их износостойкость по сравнению с кованым инструментом, изготовленным из Cr-W-Mo теплостойких сталей.

Выводы

1. Электрошлаковая наплавка жаропрочных металлических покрытий со структурой естественного композита — прочный каркас карбидной эвтектики в пластичной матрице, в которой равномерно распределены тугоплавкие наноразмерные фазы, — позволяет повысить износостойкость инструмента и деталей машин, испытывающих циклическое термосиловое воздействие.

2. Новые типы наплавленного металла, способные длительно время работать при температурах выше 1000°C, могут быть созданы на основе интер-

металлидов с упорядоченной кристаллической структурой, стабилизированной наноразмерными выделениями избыточных фаз, способствующими нейтрализации влияния движущих сил процессов разупрочнения, развивающихся в сплавах при циклическом термосиловом нагружении.

Литература

1. Поварова К.Б., Бунтушкин В.П., Казанская Н.К. и др. Особолегкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе Ni₃Al для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения. Вопросы материаловедения, 2008, №2, с.85-93.
2. Соколов Г.Н., Цурихин С.Н., Лысак В.И., Тескер Е.И. Структура и износостойкость наплавленного металла на основе алюминид никеля Ni₃Al, обработанного лазерным излучением. Упрочняющие технологии и покрытия, 2006, №6, с.24-27.
3. Анциферов В.Н., Каменева А.Л. Экспериментальное исследование строения многокомпонентных наноструктурированных покрытий на основе Ti-Zr-N, сформированных ионно-плазменными методами. Изв.ВУЗов, Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2007, №1, с.53-61.
4. Соколов Г.Н., Рябчук Г.В., Лысак В.И. Формирование композиционной структуры износостойких сплавов в процессе электрошлаковой наплавки. Изв.ВУЗов, Черная металлургия, 2008, №11, с.26-29.
5. Соколов Г.Н., Зорин И.В., Цурихин С.Н. и др. Электрошлаковая наплавка термостойкого сплава на основе Ni₃Al на сталь с целью упрочнения инструмента для горячего деформирования сталей. Вопросы материаловедения, 2004, №2, с.87-98.
6. Соколов Г.Н., Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. Волгоград: ВолгГТУ, 2005, 284 с.