

**ЦВЕТКОВА ГАЛИНА ВИКТОРОВНА**

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОБЪЁМЕ  
НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСО-  
СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ**

**Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2010**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ - ВТУЗ)».

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 05-08-65442a и при финансовой поддержке МинОбрНауки в рамках государственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" № 2.1.2/1147.*

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Скотникова Маргарита Александровна**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор,  
**Рыбников Александр Иванович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
**Мотовилина Галина Дмитриевна**


**Ведущая организация:** Институт проблем машиноведения российской академии наук

Защита состоится “ **21** ” **декабря** 2010 г. в **16** ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по адресу: **195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».**  
Факс: (812) 540-01-59 e-mail: elmic@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ **19** ” **ноября** 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



Востров В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Известно, что примерно 85% отказов машин и механизмов происходит из-за износа их деталей и узлов. Для решения задач увеличения срока службы деталей машин используют различные способы поверхностного упрочнения, в частности многослойные наплавки, нашедшие широкое применение в производстве разнообразных изделий – от крупногабаритных, таких как валки прокатных станков, штампы, до мелких деталей типа рабочих лопаток смесителей.

В процессе дробления, гранулирования, приготовления различных асфальтобетонных и битумоминеральных смесей, происходит интенсивное абразивное изнашивание рабочих лопаток смесителей, срок службы которых составляет менее 2 месяцев, тогда как другие детали смесителей приходится менять в 3 раза реже, что снижает технико-экономические показатели производства.

Согласно классификации международного института сварки, применение наплавки из износостойких хромистых сталей системы Fe–C–Cr–Mn–Si–Ni–W–Mo с повышенным содержанием углерода, является одним из весьма эффективных способов повышения сопротивления абразивному изнашиванию на рабочих лопатках смесителей. Наилучшую стойкость в условиях абразивного изнашивания имеют многослойные наплавки с карбидным упрочнением. Однако существенным недостатком высоколегированных наплавочных материалов является снижение их вязкопластических и прочностных свойств из-за структурной неоднородности по сечению наплавки, наличия избыточной карбидной фазы и появления трещин, как в самом процессе наплавки, так и при последующей эксплуатации детали.

Анализ литературных данных показал, что способность металла к сопротивлению абразивному изнашиванию зависит не только от типа и количества карбидов или боридов, но и от способности основы прочно удерживать твёрдые включения. Так, при неблагоприятной структуре, сплавы с большим количеством упрочняющей фазы могут оказаться весьма мало износостойкими вследствие как их недостаточной твёрдости, так и чрезмерной хрупкости металлической матрицы. При отсутствии достаточной связи на границе раздела фаз, происходит выкрашивание твёрдых включений. Однако в литературе пока ещё не получили достаточного освещения работы, касающиеся вопросов комплексного исследования структурно-фазовых превращений в многослойных наплавочных материалах на всех структурных уровнях.

Поэтому, работа по установлению закономерностей структурных и фазовых превращений и их влияния на повышение износостойкости многослойных наплавочных материалов и увеличения срока службы рабочих лопаток смесителей, является, безусловно, **актуальной**.

**Цель работы и задачи исследования.** Цель настоящей работы заключалась в изучении на различных структурно-масштабных уровнях закономерностей структурных и фазовых превращений в объеме многослойных наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей машин.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать методику триботехнических испытаний материалов, которая позволит получить достоверные результаты;
- провести исследования влияния размера зерна, степени легирования матрицы и количества упрочняющих фаз на износостойкость наплавочных материалов, находящихся в феррито-перлитном и аустенитно-мартенситном состояниях;
- провести исследование фазового состава и морфологии распределения карбидов и карбидосодержащих фаз.
- установить качественные и количественные закономерности изменения параметров структурно-фазового состояния, как в материале основы, так и во всех последующих наплавочных слоях на различных расстояниях от линии сплавления;
- сделать научно-обоснованный выбор оптимального состояния наплавочного материала поверхностного слоя, обеспечивающего максимальную износостойкость рабочих лопаток смесителей;
- разработать испытательную центробежную установку (ИЦУ), имитирующую ударное воздействие гранитными частицами и позволяющую исследовать структурные и фазовые превращения в наплавочных материалах рабочих лопаток смесителей на этапе их эксплуатации.

#### **Научная новизна.**

- При помощи метода просвечивающей электронной микроскопии впервые обнаружено закономерное изменение структурно-фазового состояния и свойств материала в наплавочных слоях по толщине многослойных наплавов. Показано, что вблизи *линии сплавления* со стороны материала основы в структуре формируются значительные термические напряжения, достигается максимальная твёрдость и пересыщение легирующими элементами. *Во втором* наплавочном слое происходит максимальное разупрочнение материала, присутствуют все признаки зоны термического влияния. В четвёртом *поверхностном* слое происходит повторное упрочнение материала за счёт формирования ячеистых дислокационных структур
- Установлено, что износостойкость наплавочных материалов увеличивается по мере возрастания зернограницного, твёрдорастворного и дисперсионного упрочнения матрицы с предпочтительным вкладом последнего.
- Установлено оптимальное количественное соотношение мартенситной, аустенитной, и упрочняющей фаз, обеспечивающих максимальную износостойкость наплавов, которое достигается при относительно равном их соотношении.
- Показано, что износостойкость наплавочных материалов определяется не только количеством и размером структурных и фазовых составляющих, но и их морфологией распределения. Максимальной износостойкостью обладают мелкие зёрна с твёрдой мартенсито - карбидной структурой, оконтурованные мягкой аустенитно - ледебуритной карбидосодержащей оторочкой.
- В результате проведенных исследований получены новые технические решения, подтвержденные патентом РФ.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученный комплекс результатов исследования структурных и фазовых превращений и физико-механических свойств наплавочных материалов различного структурного типа по-

зволил дать рекомендации для повышения износостойкости поверхности рабочих лопаток смесителей.

- Результаты работы были использованы на предприятиях ОАО “ЛМЗ”, ООО “Орис - ММ”, ООО “Альянс”.

- Результаты работы нашли отражение в разработке методических указаний в рамках проводимых преподавателями лабораторных работ по дисциплине «Методы триботехнических испытаний», в разработке учебного пособия.

- Результаты работы нашли отражение при чтении автором лекций по дисциплинам «Основы теории трения» и «Физико-химические процессы при трении».

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием фундаментальных положений физики твёрдого тела, большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных), сопоставлением установленных в работе закономерностей с фактами, полученными другими исследователями.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 11 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на: 1 и 2 Собрании металловедов России, Пенза, 1993, 1994; Международной конференции «Технология-94», СПб., 1994; 8-ой Международной конференции «Пленки и покрытия», СПб., 2007; Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии», Самара, 2007; World Conference Friction, Wear and Wear Protection (DGM), German, held in Aachen, April 9-11, 2008; На XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, СГТУ, 2009; II Международном семинаре «Техника и технология трибологических исследований», Иваново, ИГУ, 2009; World Conference “4 th World Tribology Congress” (WTC IV) Japan, Kyoto, September 6-11, 2009; на XX-ых «Петербургских чтениях по проблемам прочности», СПб., 2010; 49 международная конференция Актуальные проблемы прочности, Киев, Украина, 2010; на научно-технических семинарах кафедры «Триботехника» ПИМаш 2006-2010г.г.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 21 печатных работах, в том числе в 3-х статьях, в изданиях, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список основных работ приведён в конце автореферата.

Диссертационная работа была выполнена автором: – в рамках Гранта РФФИ № 05-08-65442 (2005-2008 гг.); – в рамках целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" № 2.1.2/1147 (2009-2010 гг.) (н.р. проф. М.А. Скотникова).

**Структура и объем работы** Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 144 наименований и приложения, изложена на 210 страницах, включая: 17 - таблиц, 97 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведён обзор теоретических и экспериментальных результатов работ, посвящённых исследованию структурно-фазовых превращений, протекающих в наплавочных материалах для увеличения срока службы деталей машин. Проведён анализ состояния вопроса, относительно комплексного исследования закономерностей структурных и фазовых превращений в объеме наплавочных материалов, находящихся в широком диапазоне типов структур от ферритно-перлитной до аустенитно-ледебуритной и мартенситной, содержащих различное количество упрочняющих фаз. В результате выполненного анализа определены основные задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** сделано обоснование выбора материалов и основных методов для исследования. Материалом для исследования явились 10 образцов из стали 45 на поверхность которых были нанесены по 5 наплавочных слоёв с различными химическими составами системы Fe–C–Cr–Nb–Mo–V–B–Si–Mn. Толщина каждого наплавленного слоя составляла 2 мм. После многослойной наплавки, 5-ый слой практически снимался в результате выравнивания поверхности за счёт окончательной механической обработки фрезерованием.

Исследовались 8 опытных износостойких наплавов с аустенитно-мартенситно-ледебуритной структурой с различным количеством упрочняющих фаз, которые наносились на сталь 45 с помощью электродов УОНИ 13 под опытными флюсами с 8-ью различными химическими составами.

Для сравнения, исследовались 2 наплавки с ферритно-перлитной и аустенитно-мартенситной структурами, которые наносились на сталь 45 с помощью электродной ленты марки 08КП под флюсами ФЦ-16 и ФК-45, соответственно.

В работе были использованы методы оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального анализа, проведены испытания на макро- и микро-твёрдость, износостойкость.

**В третьей главе** представлены результаты исследования структурных и фазовых составляющих в различных слоях 2-ух наплавочных материалов с ферритно-перлитной и аустенитно-мартенситной структурами, полученных под флюсами ФЦ-16 и ФК-45, соответственно.

Исследование структурно-фазового состояния, твёрдости, химического состава многослойных наплавов осуществляли в обоих наплавочных материалах, как в металле основы стали 45, вблизи линии сплавления, так и на различных расстояниях от неё с шагом 2 мм, во всех последующих слоях, вплоть до четвёртого *поверхностного* слоя, рис.1,2.

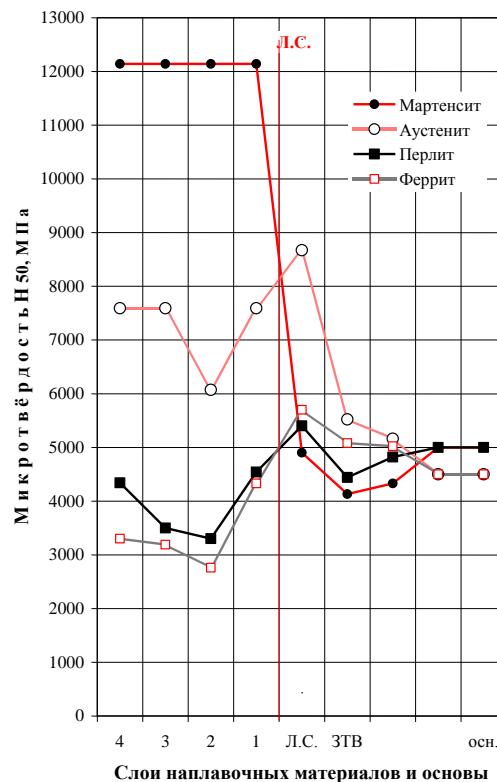


Рисунок 1. Микротвёрдость по сечению наплавов, полученных под флюсами ФК-45 (●○) и ФЦ-16 (■□)



С помощью просвечивающей электронной микроскопии было выявлено, что в металле основы из стали 45 присутствуют зёрна структурно-свободного феррита рис.2(г), с твёрдостью 4500 МПа и колонии перлита размером 5-15 мкм с межпластинчатым расстоянием  $\lambda=0,08 - 0,14$  мкм, рис.2(д) и твёрдостью 5000 МПа.

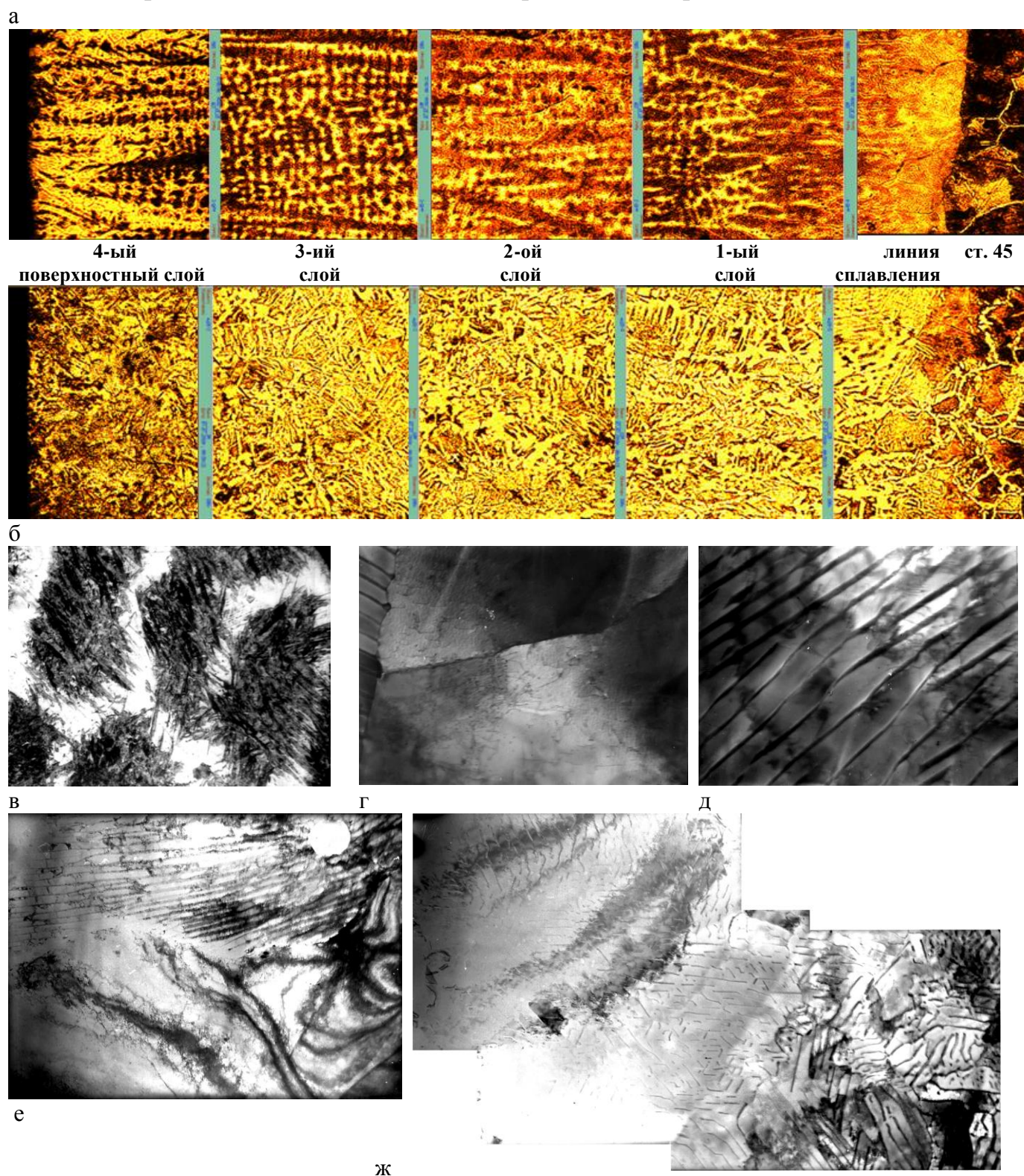


Рисунок.2. Аустенитно-мартенситные (а,в) и ферритно-перлитные (б, г-ж) структуры наплавленных слоёв под флюсами ФК-45 и ФЦ-16, соответственно, близи линии сплавления (е,ж) и в металле основы из стали 45(г,д).  $\times 100$  (а,б),  $\times 1000$  (в),  $\times 39000$  (г),  $\times 24000$  (д),  $16000$  (е,ж).

Вблизи *линии сплавления* (Л.С.) со стороны металла основы (жидко-фазного превращения), присутствовали мощные экстинкционные контура, рис.2(е), обусловленные действием полей термических напряжений, достигались минимальные значения дислокационной плотности  $2 \cdot 10^{10}$ , см<sup>-2</sup>. Происходило *растворение пластин цементита*, наблюдалось значительное повышение микротвёрдости светлой фазы до 5700 МПа, за счёт пересыщения его углеродом и кремнием до 0,1 и 0,2%, соответственно. Здесь происходило формирование верхнего бейнита, рис.2(ж).

В структуре *2-го наплавочного слоя* на расстоянии 3 мм от линии сплавления, наблюдали значительное разупрочнение, как светлой фазы (феррита) до 2800 МПа, так и тёмной (перлита) до 3300 МПа, рис.1, что свидетельствовало о значительной релаксации внутренних напряжений. Наблюдали следы твёрдофазного (без формирования расплава)  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  превращения: *распад зёрен свободного феррита* и формирование наряду с крупными зёрнами феррита порядка 10...20 мкм, очень маленьких размером около 1 мкм, рис.3(а) и высокой дислокационной плотностью порядка  $5 \cdot 10^{10}$ , см<sup>2</sup>. Наблюдали *распад крупных частиц цементита* и повторное выделение *вторичных* мелких частиц цементита вдоль границ ячеек, фрагментов, рис.3(б). Полученные результаты свидетельствовали, о том, что во 2-ом наплавочном слое протекали структурные превращения под действием термического влияния, аналогично ЗТВ в металле основы при сварке. Нередко вдоль границ ферритно-перлитных зёрен наблюдали формирование зародышевых микротрещины, рис.3(в).

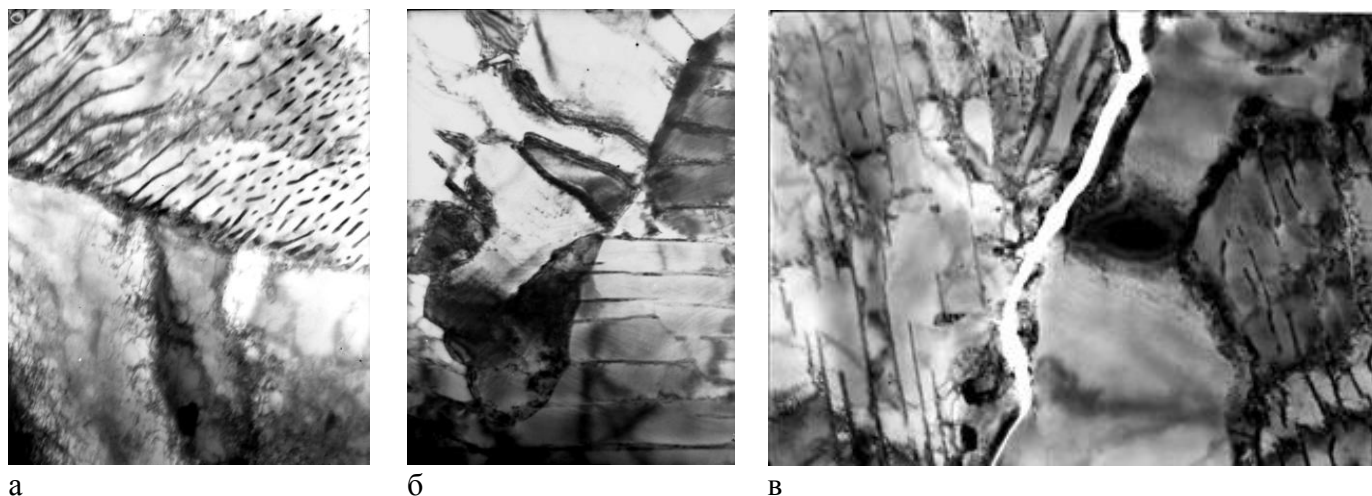


Рисунок.3. Электронно-микроскопическое изображение структуры 2-ого слоя наплавки приготовленных под флюсом ФЦ-16. х 24000 (а,в), х47000 (б)

В структуре *4-ого поверхностного слоя* достигалось повторное упрочнение материала за счёт формирования мелкой дислокационной субзёрненной структуры с размером ячеек 0,5-0,8 мкм, рис.4(а, б). Здесь были максимальные значения дислокационной плотности  $10 \cdot 10^{10}$ , см<sup>-2</sup> и микротвёрдости, которая достигала для феррита до 3300 МПа и перлита до 4300 МПа, соответственно. В стыках ферритно-перлитных зёрен наблюдали островки нижнего бейнита, рис.4(в).

Таким образом, результаты проведённой работы показали, что при выбранной технологической схеме нанесения наплавки, поверхностный её слой являлся представителем, обеспечивающим хорошее структурно-фазовое состояние материала.



Действительно, стандартные образцы на растяжение и изгиб, вырезанные и наплавочных материалов, приготовленных под флюсами ФЦ-16 и Фк-45 показали значительное повышение вязко-пластических свойств и снижение коэффициента трения по сравнению со сталью 45, табл.1.



Рисунок 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры в поверхностном слое наплавов приготовленных под флюсами ФЦ-16. x 16000 (а), x 24000 (б,в)

Таблица 1. Механические свойства исследованных заготовок из стали 45

Механические свойства	$\sigma_B$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta$ %	$\Psi$ %	КСУ Дж/см <sup>2</sup>	НРС	Н <sub>ц</sub> , МПа	Коеф- фици- ент тре- ния	Весо- вой- износ, г	Износостой- кость, ε
Тип основы и наплавленной структуры										
Ферритно- перлитная	448	298	30	70	17,9	10	3770	0,18	0,293	0,5
Аустенитно- мартенситная	452	308	33	73	15,6	52	9110	0,22	0,098	1,5
Сталь 45	470	245	19	42	14,5	20	4000	0,23	0,147	1

Однако проведённые трибологические испытания наплавленного материала с ферритно-перлитной структурой по сравнению со сталью 45 показали (см. табл. 1) меньшую его относительную износостойкость ( $\epsilon = 0,5$ ) и поэтому оказывающиеся непригодными для условий эксплуатации рабочих лопаток смесителей.

***В четвёртой главе*** представлены результаты исследования и оптимизации соотношения количества структурных и фазовых составляющих в 8-ми наплавочных материалах с аустенитно – мартенситно - ледебуритной структурами с различным количеством упрочняющих фаз, полученных под опытными флюсами.

Наплавление производили на сталь 45 электродами марки УОНИ 13, в покрытия которых входили различные легирующие элементы, такие как С, Сг, Nb, Мо, Mn, V, Si, В. При проведении наплавочных работ все легирующие элементы с различными коэффициентами перехода попадали в наплавленный металл, что и определяло его фазовый и химический состав, структуру и свойства.

Опытные наплавки в поверхностном слое содержали 0,8 - 1,8% углерода; 6,3 – 10,4% хрома; 0,7 – 0,9% марганца; 0,7% кремния; 1,0 – 2,7% ванадия; 4,4 – 7,8% молибдена; 0,4 – 2,4% ниобия; 0,05 - 0,32% бора.

Идентификацию фазового состава наплавов проводили с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре "Rotaflex" с использованием картотеки JCPDS и персональный ЭВМ.

Во всех исследованных наплавках системы Fe–C–Cr–Nb–Mo–V–B–Si–Mn основными фазовыми составляющими были мартенсит и остаточный аустенит (табл. 2). Кроме того, присутствовали упрочняющие фазы в виде боридов (CrB<sub>2</sub>, CrB) и карбидов (NbC, V<sub>2</sub>C, Cr<sub>2</sub>C, Fe<sub>2</sub>C, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>), карбоборида (Cr<sub>7</sub>BC<sub>4</sub>) и интерметаллида (FeV) в зависимости от соотношения содержания карбидообразующих легирующих элементов и углерода.

Таблица 2. Фазовый состав исследованных наплавов

Наплавка	Содержание аустенита, А, %	Содержание упрочняющей фазы, К, %	Карбиды, интерметаллиды	Карбобориды	Бориды
1	10	5	NbC; V <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> BC <sub>4</sub>	—
4	23	1,4	—	Cr <sub>7</sub> BC <sub>4</sub>	—
7	20	1,1	—	Cr <sub>7</sub> BC <sub>4</sub>	—
3	26	16	NbC	—	CrB <sub>2</sub>
6	62	9	NbC; Fe <sub>2</sub> C; (Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	—	—
5	48	23	NbC; Cr <sub>2</sub> C	—	CrB; CrB <sub>2</sub>
2	47	6	V <sub>2</sub> C; Fe <sub>2</sub> C; (Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	—	—
8	38	30	NbC; V <sub>2</sub> C; Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> ; (Cr, Fe, Mo) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> ; FeV	—	CrB; CrB <sub>2</sub>

Полученные структуры 8-ми опытных наплавов имели размер зёрен D<sub>3</sub> = 10...50 мкм, содержали 10 – 62% аустенита, 29 – 85% мартенсита и 1 – 30% упрочняющих фаз при твердости металла, достигающей 26 - 61 HRC и (3600 - 12500) H<sub>50</sub> (см. табл. 2 и 3).

Далее из этих наплавов изготавливали стандартные образцы для испытаний на абразивное изнашивание и производили оценку износостойкости (ε) относительно эталона, которым являлась сталь 45. Износостойкость наплавочных материалов изменялась в широком интервале от 0,63 до 5,89, табл. 3.

На рис.5 и в табл. 2 и 3 наплавки расположены в порядке возрастания их отно-

Таблица 3. Свойства исследованных наплавов.

Номер наплавки	Размер зерна, Дз, мкм	Макротвёрдость, HRC	Микротвёрдость, H <sub>50</sub>	Относительная износостойкость, ε
1	16	27,5	3600	0,63
4	50	50	10640	1,18
7	50	47	12140	1,43
3	30	60	8440	1,88
6	40	33,5	7450	3,30
5	30	55	12500	3,44
2	15	58	7740	3,66
8	10	61	7540	5,89

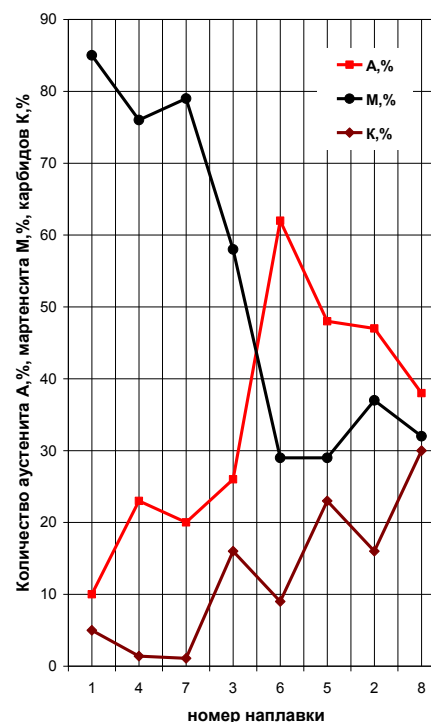
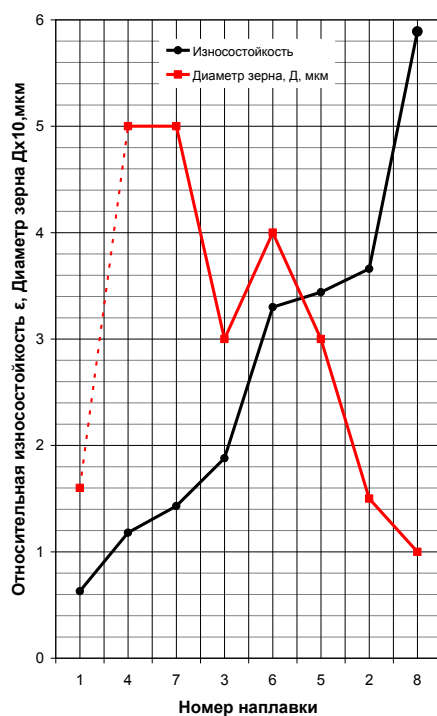
сительной износостойкости ( $\epsilon$ ), которая сравнивалась с размером зерна ( $D_z$ ), рис.5(а); с количеством мартенсита (М), аустенита (А) и упрочняющих фаз (К), рис.5(б); концентрацией карбидообразующих легирующих элементов относительно углерода ( $\Sigma \text{л.э.} / \%C$ ), рис.5(в); и твердостью наплавочных материалов (Hц, HRC), рис.5(г).

Как видно из рис. 5(а), относительная износостойкость наплавов возрастала по мере уменьшения размера первичных аустенитных зёрен ( $D_z$ ), что обеспечивало *зернограничное* упрочнение наплавочных материалов.

Как видно из рис. 5(б), относительная износостойкость наплавов возрастала по мере увеличения содержания количества упрочняющих фаз (К), что обеспечивало *дисперсионное* упрочнение наплавочных материалов.

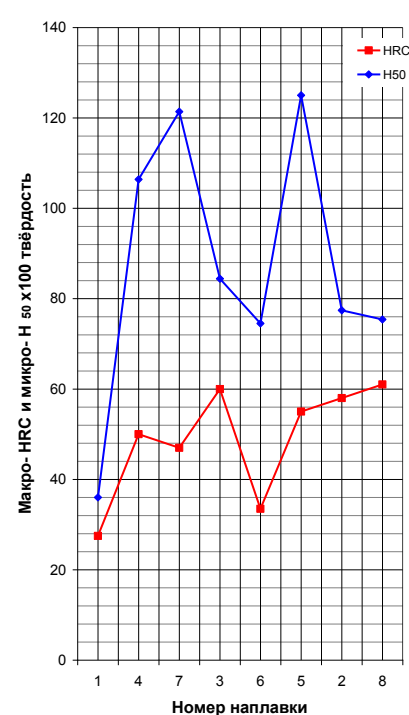
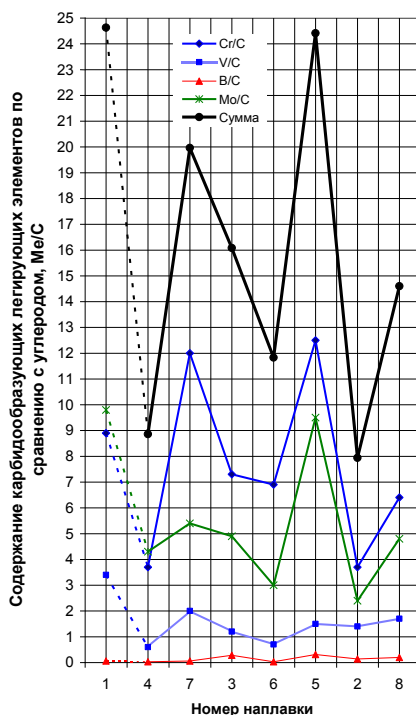
Кроме того, относительная износостойкость наплавов возрастала по мере уменьшения количества мартенсита и увеличения содержания аустенита рис.5(б).

Кроме того, показано, что только *оптимальное* соотношение количества мартенситной, аустенитной, и упрочняющей фаз, обеспечивает максимальную износостойкость наплавочных материалов, которая достигается при относитель-



а

б



в

г

Рисунок 5. Изменение размера зёрен  $D$  (а), количества мартенсита (М), аустенита (А) и упрочняющих фаз (К) (б), содержания карбидообразующих легирующих элементов по сравнению с углеродом  $Me / C$  (в), макро HRC и микро H50, твёрдости (г) исследованных наплавов по мере возрастания их износостойкости  $\epsilon$  (а).

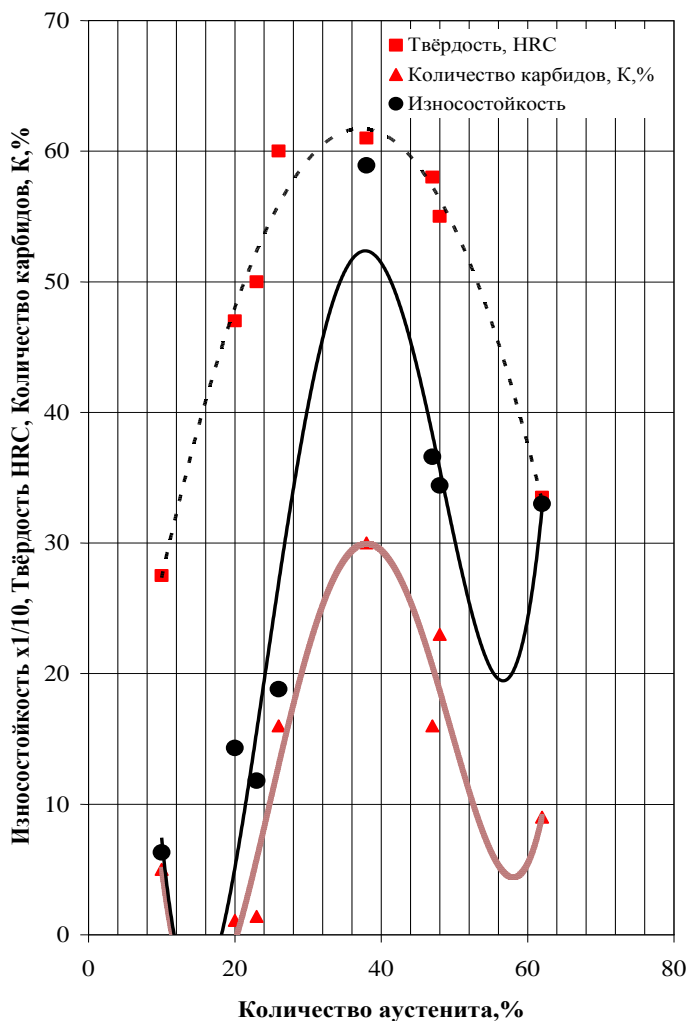


Рисунок 6. Механические свойства, химический и фазовый состав исследованных наплавов

тенсида 30-40% и упрочняющих фаз 25-30% обеспечивало закрепление максимального количества частиц упрочняющих фаз и достижение максимальной относительной износостойкости  $\epsilon = 5,89$  и твёрдости HRC 61 наплавочных материалов, рис. 6.

**В пятой главе** представлены результаты исследования и оптимизации морфологии распределения карбидов и карбидосодержащих фаз вдоль границ и в теле зёрен по мере увеличения износостойкости наплавочных материалов.

Для анализа морфологии и расположения фаз в структуре, проводили исследования с помощью просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-200 методом одноступенчатых угольных реплик и на оптическом микроскопе ММР-4 (рис.7 - 9).

Каждая из обнаруженных фаз имела свои морфологические признаки: карбид NbC во всех сплавах (наплавки 1, 3, 6, 5, 8) входил в состав эвтектики (аустенит + NbC), располагающейся обычно вдоль границ зерен, рис. 7(а).

Карбиды хрома (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> прямоугольной неправильной формы (наплавки 6, 8) и карбобориды Cr<sub>7</sub>BC<sub>4</sub> (наплавки I, 4, 7) располагались в аустенитной составляющей, которая формировалась в виде окантовки вокруг зерен со структурой мартенсита, рис. 7(б, в).

но равном их соотношении, рис. 5(б).

Как видно из рис. 5(в), на наплавках 5 и 7 достигалась максимальная концентрация карбидообразующих легирующих элементов в твёрдом растворе не связанных в карбиды. На этих же наплавках достигалась и максимальная твёрдость, рис. 5(г), что обеспечивало *твёрдорастворное* упрочнение наплавочных материалов.

Таким образом, показано, что *износостойкость* наплавочных материалов возрастает за счёт увеличения твёрдорастворного, дисперсионного и зернограницного упрочнения материала, то есть за счёт увеличения суммарной концентрации карбидообразующих *легирующих элементов* в твёрдом растворе; увеличения количества карбидов и карбидосодержащих фаз; и увеличения прочностных и вязкопластических свойств за счёт уменьшения *размера зёрен*.

Установлено *оптимальное* структурно-фазовое состояние наплавочных материалов. Содержание в наплавочном материале аустенита 35-40%, мар-

Мелкие трудно растворимые частицы фазы внедрения карбида  $V_2C$  округлой формы (в наплавках 1, 2, 8) выделялись, как правило, внутри зерен и обеспечивали измельчение первичных зёрен аустенита, рис. 7(г).

Частицы боридов  $CrB$  и  $CrB_2$  располагались вдоль границ зерен и вблизи эвтектики (аустенит +  $NbC$ ) (в наплавках 3, 5, 8), рис. 7(д).

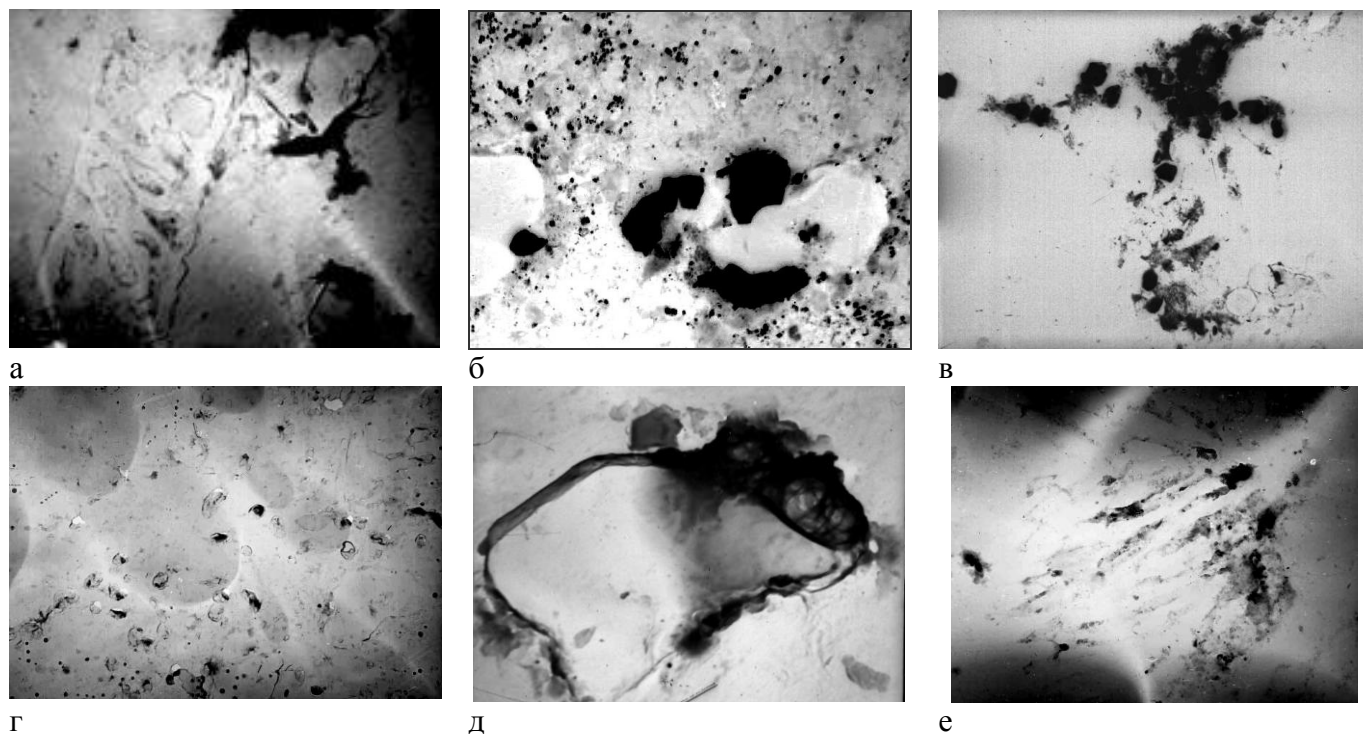


Рисунок 7. Электронно-микроскопические изображения упрочняющих фаз в исследованных наплавках.  $NbC$  (а),  $(Cr, Fe)_7C_3$  (б),  $Cr_7VC_4$ (в),  $V_2C$  (г),  $CrB$  (д),  $Fe_2C$  (е).  $\times 9000$

Трудно обнаруживаемые когерентные  $\epsilon$  - карбиды  $Fe_2C$  наблюдались в мартенситной структуре в виде высокодисперсных частиц (в наплавках 6, 2), рис. 7(е).

Оказалось что, по мере возрастания износостойкости наплавков ( $\epsilon$ ), в теле зерна и по их границам, растёт число вторичных фаз, увеличивается их размер, усложняется конфигурация.

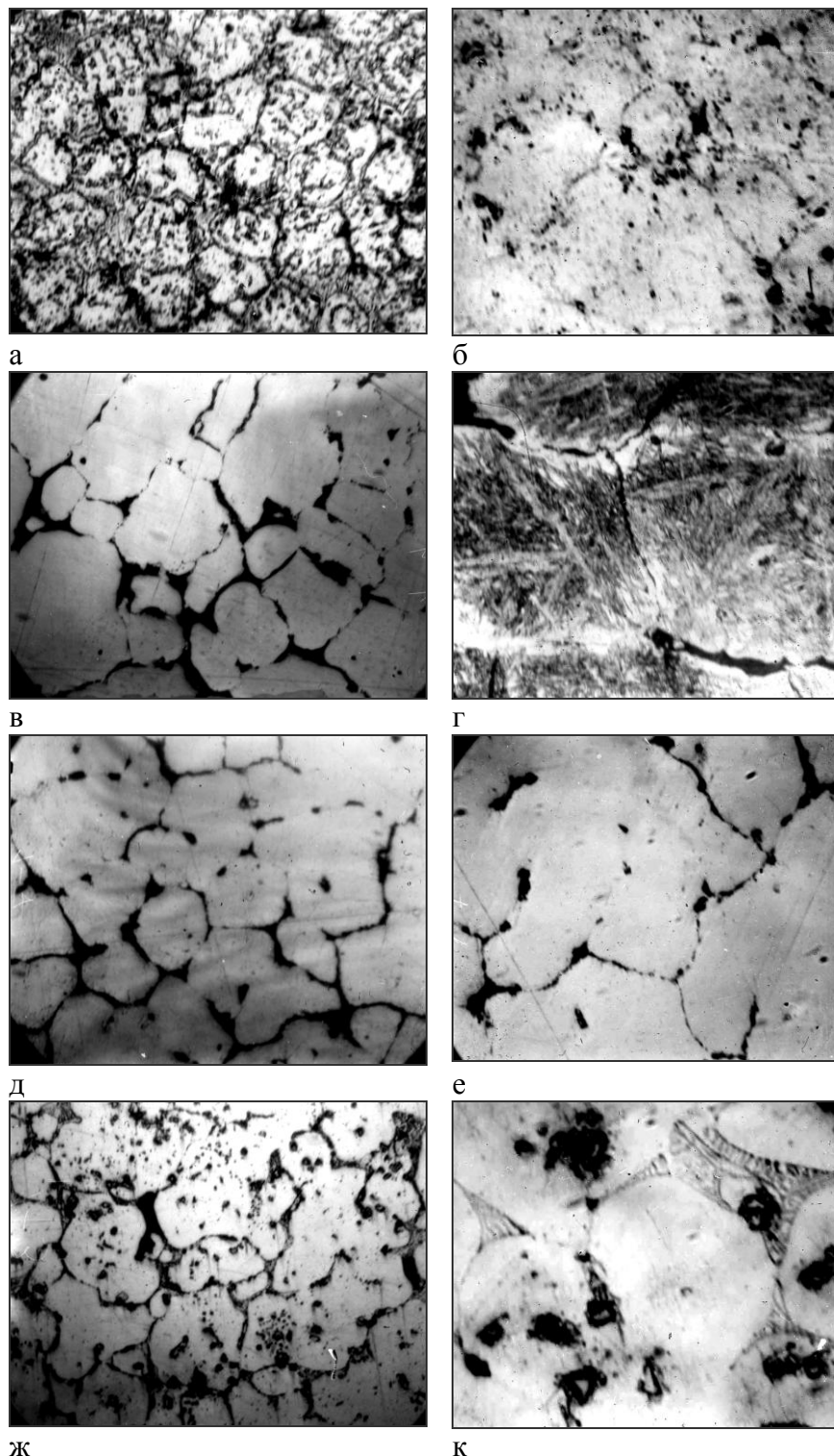
Наблюдалось немонотонное ступенчатое возрастание сопротивления изнашиванию образцов из наплавков 1, 4, 7, 3 (I ступень), 6, 5, 2 (II ступень), 8 (III ступень).

Образцы наплавки 1 обладали самой низкой износостойкостью ( $\epsilon = 0,63$ ). В их ферритокарбидной структуре практически отсутствовала аустенитная составляющая, и мелкие округлые частицы фаз легко выкрашивались из мартенситной основы при абразивном изнашивании, снижая тем самым работоспособность материала, рис. 8(а,б).

В структуре образцов из наплавков 4, 7, 3, соответствующих I ступени повышения износостойкости ( $\epsilon=1,18 - 1,88$ ), по границам зерен с мартенситной структурой образовывались островки аустенитной или аустенитно-ледебуритной составляющей в которой надежно заклинивались и поэтому не выкрашивались, а истирались крупные частицы  $Cr_7VC_4$  и  $CrB_2$ , рис. 8(в-к).



У образцов из наплавов 6, 5, 2, соответствующих II ступени повышения износостойкости ( $\epsilon=3,30 - 3,66$ ), сформировалась качественно новая структура, рис.9(а-е)



По границам твёрдых зерен с мартенситно-карбидной структурой ( $M + Me_2C$ ), появилась сплошная окантовка из мягкого остаточного аустенита, который, обладая высокими вязко - пластическими свойствами, надёжно удерживал твердые частицы  $(Cr, Fe)_7C_3$ ,  $NbC$ , в результате чего наплавки имели высокую износостойкость, рис. 9(а-е).

Следует также отметить, что при трении по абразиву, аустенит может полностью или частично претерпевать превращение в мартенсит, что должно приводить к дополнительному повышению износостойкости наплавленного материала.

Образцы наплавки 8, соответствующей III ступени повышения износостойкости ( $\epsilon = 5,89$ ), имели структуру с мелкими зернами, окантованными аустенитно-ледебуритной составляющей с большим количеством карбидов, боридов, карбоборидов и интерметаллидов, обеспечивающих наибольшее сопротивление абразивному изнашиванию, рис. 9(ж-к).

Таким образом, впервые показано, что износостойкость наплавочных материалов повышается не только с увеличением общего количества, твёрдости и размеров частиц упрочняю-

Рисунок 8. Структура исследованных номеров наплавов (N) 1(а,б), 4(в,г), 7(д,е), 3(ж,к) по мере возрастания их износостойкости  $\epsilon$ .  $\times 100$  (а,в,д,ж),  $\times 1000$  (б,г,е,к).

только с увеличением общего количества, твёрдости и размеров частиц упрочняю-

щих фаз, но и с формированием оптимальной морфологии распределения карбидов и карбидосодержащих фаз вдоль границ и в теле зёрен.

Показано, что оптимальными свойствами обладает структура из твёрдых зерен диаметром 10-15 мкм с мартенситной структурой, упрочнённых дисперсными карбидами типа  $Me_2C$  и окантованных мягкой аустенитно - ледебуритной оторочкой. Большинство высокопрочных карбидов и боридов хрома, ниобия и ванадия располагаются в мягкой оторочке и не выкрашиваются.

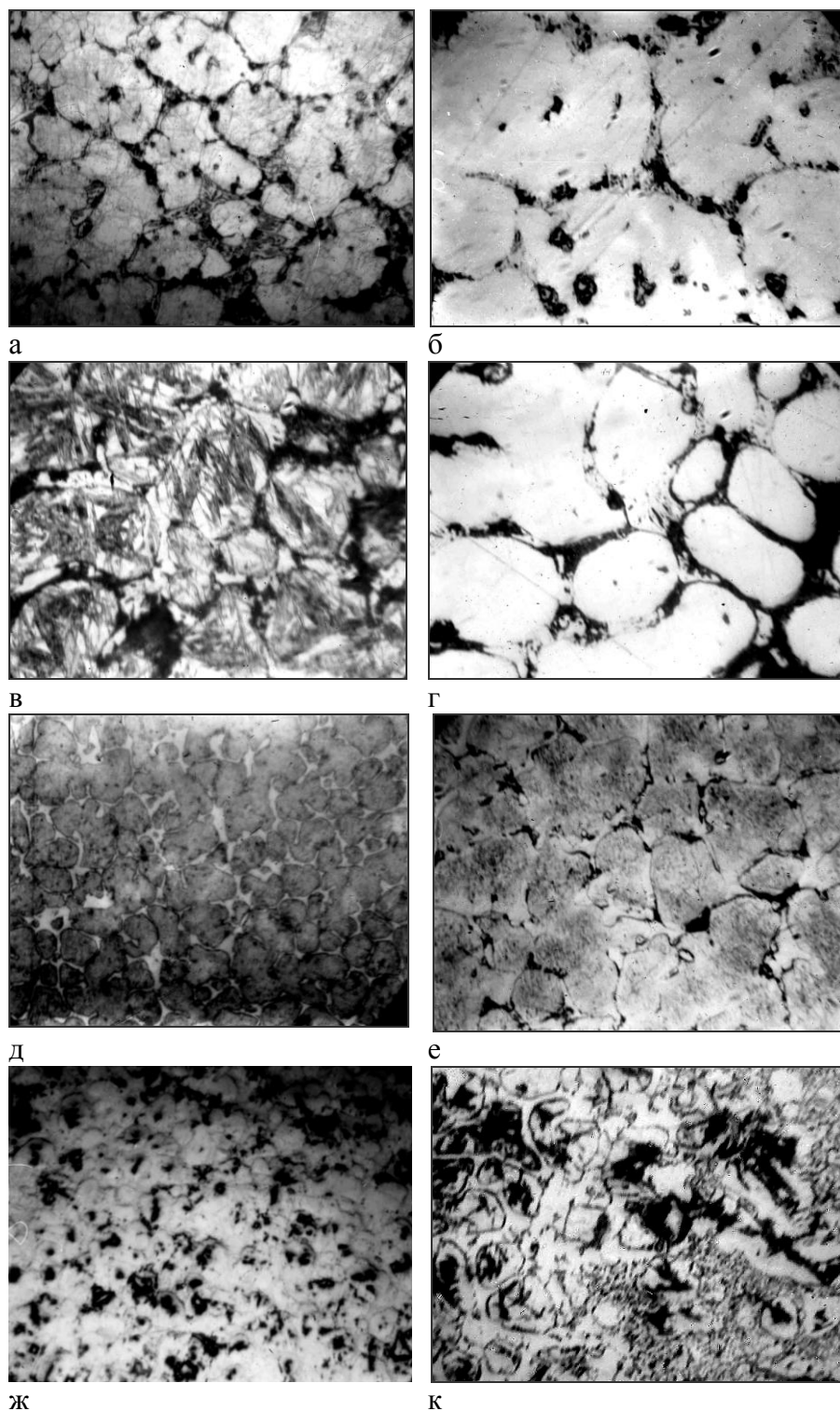


Рисунок 9. Структура исследованных номеров опытных наплавов (N) б(а,б), 5(в,г), 2(д,е), 8(ж,к) по мере возрастания их износостойкости  $\epsilon$ .  $\times 100$  (а,в,д,ж),  $\times 1000$  (б,г,е,к).

На рис. 10 представлена принципиальная схема структурно-фазового состояния наплавочных материалов по мере возрастания их износостойкости в зависимости от размера зёрен, количества основных и вторичных фаз, а так же от морфологии их распределения.

Таким образом, износостойкость наплавов определяется комплексом факторов: прочностью матрицы; твердостью, конфигурацией и распределением упрочняющих фаз; прочностью сцепления матрицы с частицами.

Наиболее высокое сопротивление изнашиванию достигается при определенном количественном и качественном структурно-фазовом состоянии наплавов, когда

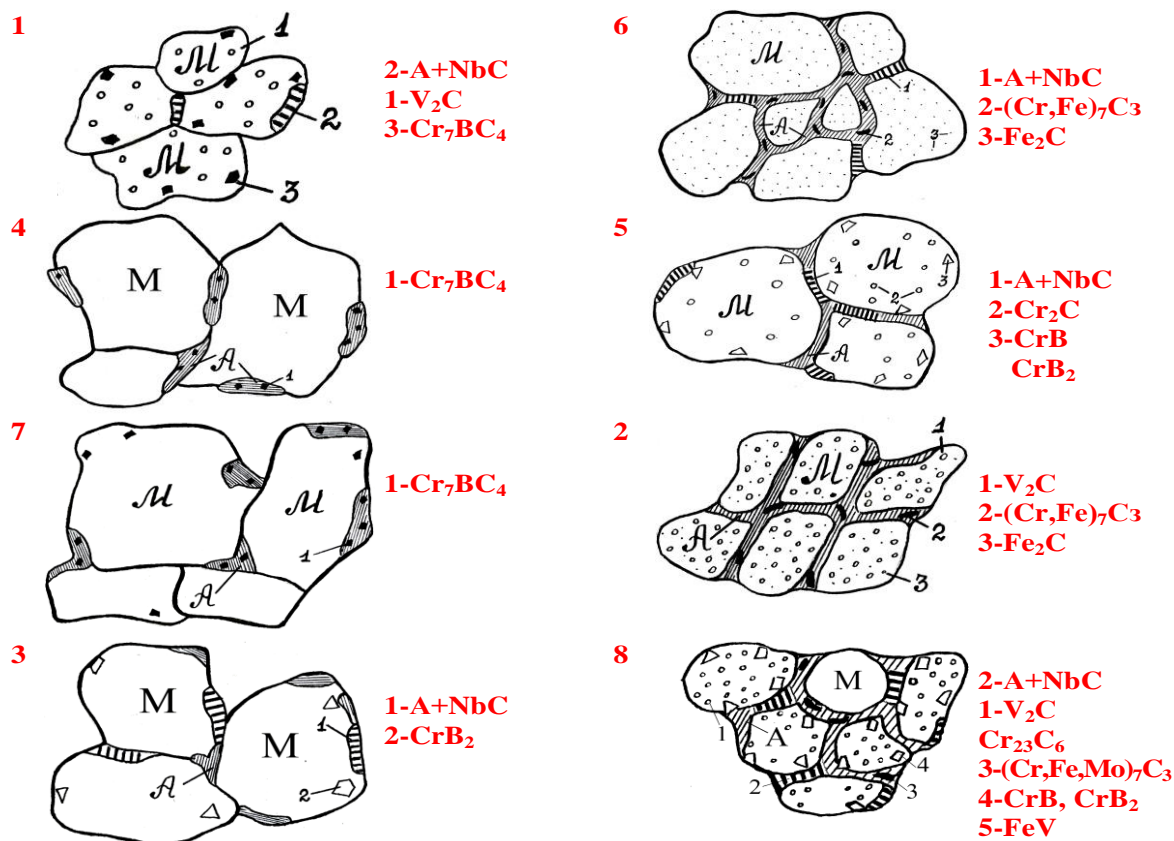


Рисунок 10. Схемы структурно-фазового состояния исследованных наплавков.  
Цифры - номера наплавков

измельченные зерна с мартенситной структурой, упрочненные дисперсными частицами типа  $Me_2C$ , окантованы пластичной аустенитной или аустенитно-ледебуритной составляющей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые по единому целенаправленному плану изучены структурно-фазовые превращения в объёме многослойных наплавочных материалов с аустенитно-мартенситной структурой, предназначенных для рабочих лопаток смесителей.

2. Впервые с помощью просвечивающей электронной микроскопии обнаружено закономерное изменение структурно-фазового состояния и свойств материала в различных наплавочных слоях с феррито-перлитной структурой. Показано, что *вблизи линии сплавления* со стороны металла основы в структуре верхнего бейнита формируются большие внутренние термические напряжения, достигается максимальная твёрдость и пересыщение легирующими элементами. *Во втором наплавочном слое* происходит максимальное разупрочнение материала, присутствуют все признаки зоны термического влияния, как в металле основы при сварке. *В четвёртом поверхностном слое* происходит повторное упрочнение материала, обусловленное формированием *нижнего бейнита* и дислокационной субзёрненной структуры.

3. Установлено, что *износостойкость* наплавочных материалов возрастает по мере увеличения зернограничного, твёрдорастворного и дисперсионного упрочнения матрицы с преобладанием последнего вклада, то есть за счёт уменьшения *размера зёрен*, увеличения суммарной концентрации карбидообразующих *легирующих*

элементов в твёрдом растворе и увеличения количества карбидов и карбидосодержащих фаз.

4. Показано, что в наплавках системы Fe–C–Cr–Nb–Mo–V–B–Si–Mn структура материалов характеризуется образованием мартенситной, аустенитной и упрочняющей фаз в виде боридов (CrB<sub>2</sub>, CrB) и карбидов (NbC, V<sub>2</sub>C, Cr<sub>2</sub>C, Fe<sub>2</sub>C, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>), карбоборида (Cr<sub>7</sub>BC<sub>4</sub>) и интерметаллида (FeV) в зависимости от соотношения содержания карбидообразующих легирующих элементов, углерода и бора.

5. Впервые показано, что *износостойкость* наплавочных материалов определяется не только количеством, твёрдостью и размером карбидов и карбидосодержащих фаз, но и *морфологией их распределения вдоль границ и в теле зёрен*. Максимальной износостойкостью обладают мелкие зёрна диаметром 10-15 мкм, с твёрдой мартенситной структурой, упрочнённой дисперсными карбидами типа Me<sub>2</sub>C и окантованные мягкой аустенитно - ледебуритной карбидосодержащей оторочкой. Большинство высокопрочных карбидов и боридов хрома, ниобия и ванадия располагаются в мягкой оторочке и не выкрашиваются.

6. Построена принципиальная *схема* структурно-фазового состояния наплавочных материалов по мере возрастания их износостойкости в зависимости от размера зёрен, количества фаз, а так же от морфологии распределения карбидов и карбидосодержащих фаз.

7. Установлено *оптимальное* количественное соотношение мартенситной, аустенитной, и упрочняющей фаз, которое достигается при относительно равном их соотношении 30-40% и обеспечивающее максимальную износостойкость  $\epsilon = 5,89$  и твёрдость HRC 61 наплавочного материала рабочих лопаток смесителей.

8. Внедрение результатов исследований позволило повысить износостойкость и срок службы рабочих лопаток смесителя в 2,5 раза.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Берденников А.И. Исследование причин аномального износа торцевого уплотнения винтового насоса. Эффект разупрочнения / А.И. Берденников, О.Ф. Киреенко, **Г.В. Цветкова** // Трение и износ.— 1985.— т.6.— №3.— С.510-518. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению*).

2. Скотникова М.А. Механические свойства и структура наплавленного износостойкого металла / М.А. Скотникова, Ю.М. Белов, Л.Ф. Сокирянский Л.Ф., **Г.В. Цветкова** // Металловедение и термическая обработка металлов (МИТОМ).— 1994.— № 8.— С.20-23. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК*).

3. Структурное и фазовое состояние наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей / **Г.В. Цветкова** [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ, СПб. — 2010. — № 4. — С.52-63. (*Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению*).

4. Скотникова М.А. Разработка нового износостойкого твердосплавного покрытия / М.А. Скотникова, Ю.М. Белов, Л.Ф. Сокирянский, **Г.В. Цветкова** // Матер.1 Собрания металлургов России, Пенза, 12—16 окт. 1993г.— Пенза, 1993.— С.120-121.

5. Скотникова М.А. Влияние электромагнитного воздействия на структуру наплавленного металла / М.А. Скотникова, Ю.М. Белов В.Е. Завьялов, **Г.В. Цветкова** // Матер. 2 Собрания металлургов России, Пенза, 15—18 окт. 1994г.— Пенза, 1994.— С. 45 - 46.

6. Скотникова М.А. О механизме деформации металлов при сверхскоростном резании / М.А. Скотникова, В.А. Виравчева, **Г.В. Цветкова** // Технология-94: матер. междунаро. конф. Л., 1994.—Л.,1994.— С. 48-49.
7. Скотникова М. А. О природе диссипативных процессов при лезвийной обработке металлических заготовок. / М. А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Материаловедение, пластическая и термическая, обработка металлов. Сб. трудов СПб ГТУ, 1999.— С.100-102.
8. Скотникова М.А. Малоцикловая усталостная прочность титанового сплава в коррозионной среде. / М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Научно - технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: матер. конф., СПб, 1999.—С. 65-67.
9. Скотникова М.А. Природа локализации пластической деформации при обработке металлов резанием / М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Пластическая, термическая, термомеханическая обработка современных металлических материалов: матер. науч.-техн. конф., СПб, 1999.— СПб, 1999.— С. 61-64.
10. Скотникова М.А. Микролегирование бором, как способ повышения качества и надежности деформированных титановых заготовок. / М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Вопросы технологии и надежности работы систем, Сб. трудов ПИМаш. — 1999.— С. 35-44.
11. Скотникова М.А. Нанесение наплавочных материалов для повышения износостойкости изделий./ М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова**, Н.А. Крылов // Пленки и покрытия 2007: матер. науч.-техн. конф., СПб институт проблем машиноведения РАН, 2007.— СПб, 2007.— С.216-218.
- 12.Скотникова М.А. Природа формирования износа материала лопаток паровых турбин атомных электростанций./ М.А. Скотникова, А.А. Ланина, Н.А. Крылов, **Г.В. Цветкова** // Актуальные проблемы трибологии: матер. междунаро. науч.-техн. конф., Самара, 2007.— С.352-356.
13. Skotnikova M.A. Structural phase model of increase of wearability building-up welding of materials / M.A. Skotnikova, **G.V. Tsvetkova** // World Conference Friction, Wear and Wear Protection. Abstracts of the Conference of the Deutsche Gesellschaft & Materialkunde, German, held in Aachen, April 9-11, 2008.—Aachen,2008.— P.20.
14. Скотникова М.А. Контроль напряжённо-деформированного состояния титановых полуфабрикатов по структуре и внутренним напряжениям./ М.А. Скотникова, Н.А.Крылов, А.А. Ланина, **Г.В. Цветкова** // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла: матер. V междунаро. науч.-техн. конф., ООО «Энергодиагностика, М., 2009.—М., 2009.— С. 96-98.
15. Скотникова М.А.Напряжённо-деформированное состояние и микрогеометрия поверхности сплава после нанесения регулярного микрорельефа. / М.А. Скотникова, **Г. В. Цветкова**// Физика прочности и пластичности материалов: матер. науч.-техн. конф., Самара, 2009,—С. 87-88.
16. Заявка на изобретение РФ. Испытательная центробежная установка ИЦУ40. / М.И. Ильин, М.А.Скотникова, А.А.Ланина, Н.А.Крылов, **Г.В.Цветкова** —Рег. № 2009120430 от 21.05.2009.
17. Патент на полезную модель. Испытательная центробежная установка / М.И. Ильин, М.А. Скотникова, А.А. Ланина, Н.А. Крылов, **Г.В. Цветкова**.—Рег. № 2009132876 от 19.08.2009.
18. М.А. Skotnikova. Structural and phase model of increase of wear resistance of overlaying welding of materials / M.A. Skotnikova, Y.M. Zubarev, **G.V. Tsvetkova**, // World Conference “4 th World Tribology Congress” (WTC IV).Abstracts of the, Japan, held in Kioto, September 6-11, 2009 - P.441.
19. M.A Skotnikova. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying / M.A Skotnikova, **G.V. Tsvetkova** // World Conference “4 th World Tribology Congress” (WTC IV).Abstracts of the, Japan, held in Kioto, September 6-11, 2009 - P.451.
20. М.А. Скотникова. Структурно-фазовая модель повышения износостойкости наплавочных материалов по составу близких к инструментальным сталям. / М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Техника и технологии трибологических исследований: матер. 2 Международного семинара, Иваново, 2009.— С. 66.
21. Скотникова М.А. Структурно-фазовая модель повышения износостойкости наплавочных материалов. М.А. Скотникова, **Г.В. Цветкова** // Актуальные проблемы прочности: матер. 49 междунаро. конф., Киев, 14–18 июня 2010 г. — Киев, 2010.— С.124.