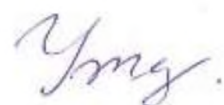


*На правах рукописи*



УТЬЕВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ

**Разработка литых инструментальных сплавов с повышенным  
содержанием ванадия и углерода для грануляции полимеров**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов  
и сплавов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Егоров Юрий Петрович

Официальные оппоненты: Чибряков Михаил Владимирович  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной механики,  
физики и инженерной графики ФГБОУ ВО  
«Санкт-Петербургский государственный  
аграрный университет»

Иванов Сергей Геннадьевич  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник проблемной научно-  
исследовательской лаборатории  
самораспространяющегося  
высокотемпературного синтеза им. В.В.  
Евстигнеева ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический университет»

Защита состоится «25» декабря 2018 г. в 14<sup>00</sup> в ауд. 3П на заседании  
диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский  
государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г.  
Новокузнецк, Кемеровская область, ул. Кирова, д.42, СибГИУ.

Факс: (3843)46-57-92

Е- mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на  
сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
www.sibsiu.ru

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.252.01,  
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В современной промышленности все большую роль в качестве конструкционных материалов играют полимеры. Технология их изготовления предусматривает операцию грануляции, которая производится в экструдерах. Процесс грануляции осуществляется непрерывно в течение длительного времени (до 2000 часов и более). При этом остановка экструдера для замены изношенных гранулирующих ножей резко уменьшает (на 100...300 тонн за одну замену) производительность процесса грануляции, так как включает притирку новых ножей в течение 8...20 часов.

В настоящее время гранулирующие ножи экструдеров изготавливают из порошковой карбидостали или из твердых сплавов. Первый случай характеризуется высокой стоимостью ножей вследствие сложности технологии изготовления карбидостали методом порошковой металлургии и высокими трудозатратами при её механической обработке. При этом ножи из карбидостали в России не изготавливаются. Во втором случае твердый сплав приводит к повышенному износу дорогостоящих фильер, а технология изготовления ножей трудоемкая и затратная.

Применение стандартных инструментальных сталей не дает необходимой стойкости инструмента. Поэтому в настоящее время актуальна задача создания дешевого и конкурентоспособного инструментального материала для изготовления гранулирующих ножей.

Важнейшей характеристикой качества режущего инструмента является его износостойкость. Принципиальное отличие в работе гранулирующего инструмента от металлорежущего заключается в том, что при обработке металлов износ идет по передней поверхности, а при грануляции по задней. Поэтому, в металлорежущем инструменте, стремятся получить дисперсную и ультрадисперсную структуру из высокотвердых карбидов с низкой карбидной неоднородностью и высокой ударной вязкостью. Для гранулирующего инструмента, наоборот, имеется возможность повышения износостойкости за счет увеличения размеров и объемной доли карбидной фазы в виде отдельных карбидов, карбидной сетки и эвтектики с карбидной фазой.

Для сложных композициях пластмасс применение известных инструментальных материалов не всегда приводит к желаемым результатам. Очень часто стали и сплавы, с успехом применяемые при обработке металлов, показывают низкую стойкость при производстве и обработке пластмасс с наполнителями.

В этом случае инструментальная промышленность идет по пути создания специальных сталей и сплавов. Примеров подобного подхода множество и можно привести в качестве такого материала сплав типа «Ferrotik» или «ELMAX» импортного производства. Эти сплавы получены методом порошковой технологии, в их структуру входят твердые карбиды титана, вольфрама и ванадия. Технология получения таких сплавов и последующая

механическая обработка существенно удорожает стоимость гранулирующего инструмента.

В то же время производство режущих инструментов по литейной технологии позволяет изготавливать инструменты с меньшими затратами, используя отходы инструментального производства. Это несомненный плюс литейной технологии, кроме того в процессе плавки можно вводить в состав сплава элементы, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.

Таким образом, разработка литых сплавов, обеспечивающих изготовление гранулирующего инструмента по ресурсосберегающей и импортозамещающей технологии, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время для гранулирующих ножей, как правило, применяются импортные порошковые карбидостали. Подобные материалы разработаны в ИФПМ СО РАН Овчаренко В.Е. Кроме того для обработки неметаллических материалов стало актуально применять литые инструментальные сплавы. Такими работами занимаются ученые из Словакии A.S. Chaus, M Dománková, а в России - В.К. Афанасьев, М.В. Чибряков, А.Н. Емелюшин. Большинство созданных материалов представляют собой белый чугун, который невозможно обработать лезвийным инструментом.

**Цель работы:** разработка и исследование состава и свойств литых сплавов на основе отходов инструментальных сталей У10 и Х6ВФ с высоким содержанием углерода (1...3%) и ванадия (0...11%) для изготовления режущих ножей при грануляции полимеров.

**Задачи:**

1. Исследовать влияние содержания углерода (от 1...3 %) и ванадия (от 0...11 %) на структуру и фазовый состав литых инструментальных сплавов на основе отходов сталей У10 и Х6ВФ.
2. Установить закономерности влияния углерода, ванадия и режимов термической обработки на свойства: твердость, ударную вязкость и износостойкость сплавов на основе отходов сталей У10 и Х6ВФ.
3. Разработать составы литых сплавов и режимы термической обработки для производства ножей, используемых при грануляции полимеров.
4. Провести производственное апробирование гранулирующих ножей из литых инструментальных сплавов на основе отходов сталей У10 и Х6ВФ.

**Научная новизна:**

1. Установлено распределение ванадия в структурных составляющих литых сплавов на основе отходов стали У10. В карбидах МС содержится  $(80 \pm 2\%)$  ванадия, а в твердом растворе  $2 \pm 0,5\%$ .
2. Определено изменение объемной доли, размеров и строения карбидной фазы для сплавов с содержанием ванадия от 2 до 11 % и углерода от 1 до 3%:
  - для сплавов на основе У10 объемная доля карбидной фазы изменяется от 2 до 24 %, а средний размер карбидов от 2 до 6 мкм;
  - для сплавов на основе Х6ВФ объемная доля карбидной фазы изменяется от 5 до 30 %, а средний размер карбидов от 2 до 7 мкм.

3. Установлено, что максимальная ударная вязкость для сплавов с содержанием ванадия от 2 до 11 % и углерода от 1 до 3% наблюдается:

- для сплавов на основе У10 при 4-6% ванадия и 1,8-2,2% углерода;
- для сплавов на основе Х6ВФ при 5-7% ванадия и 1,8-2,2% углерода.

4. Определено изменение износостойкости для сплавов с содержанием ванадия от 2 до 11 % и углерода от 1 до 3%:

- для сплавов на основе У10 износостойкость повышается в два раза;
- для сплавов на основе Х6ВФ износостойкость повышается в шесть раз.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложены сплавы для гранулирующих ножей, работающих с зазором – 140Х6Ф5, ножей, работающих с прижимом (с высокими контактными нагрузками) – 260Х6ВФ9 и сплав 300Х6ВФ11 для восстановления активной части фильер (патент РФ № 2297307 от 10.01.2006).

2. Разработаны режимы термической обработки, обеспечивающие высокие износо- и теплостойкость литых сплавов для гранулирующего инструмента:

- режим 1 (грануляция без прижима) - закалка на первичную твердость с 900°С и последующий отпуск 250-300°С;
- режим 2 (грануляция с прижимом) - закалка на вторичную твердость с 1050°С и отпуск 550-600°С.

3. Изготовлены режущие инструменты типовой и оригинальной конструкции для грануляции полипропилена и полиэтилена методами литейной технологии и подвергнуты производственным испытаниям.

4. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе, в курсах «Материаловедение и технология металлов».

**Личный вклад автора** состоит в получении результатов, изложенных в диссертации, системном анализе и отборе необходимых литературных данных в рамках заявляемой темы, подготовке образцов для исследований и промышленных испытаний, обобщении и анализе полученных результатов, формировании выводов и положений, написании статей по теме научной работы.

**Методология и методы исследования:** экспериментальные сплавы отливались на индукционной установке ИСТ-0,16 с кислым тиглем, вес отливки 15 кг. В качестве шихты использовались отходы инструментальных сталей У10, Х6ВФ и ферросплавы. Контроль температуры осуществлялся инфракрасным оптическим пирометром Termopoint 902MSC «Agema». Химический состав исследуемых сплавов определялся оптико-эмиссионным спектрометром РМІ-MASTER Sort. Металлографические исследования сплавов проводились с использованием средств оптической (*МИМ-8М* и «Axio Observer») и сканирующей электронной («*Camebax-Microbeam*») микроскопии. Рентгеноструктурный фазовый анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН-2,0. Испытания на трение скольжения велись на машине трения 2168 УМТ-1 по схеме «палец-диск». Для расчета объемной доли карбидов применялась программа «Система КОИ» с увеличением 800 крат.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Микроструктурное обоснование закономерности влияния ванадия и углерода на формирование структуры сплавов и их свойства. В сплавах на основе отходов У10 при легировании ванадием наблюдается рост среднего размера карбидной фазы в 3 раза, а объемной доли карбидов в 14 раз. Так же отмечено дробление карбидной сетки, что приводит к повышению механических характеристик.

2. Режимы термической обработки, при которой инструментальные сплавы на основе отходов Х6ВФ обеспечивают повышение износостойкости в 1,5...6 раз по сравнению с литой сталью Х6ВФ за счет увеличения объемной доли карбидной фазы и создания в зоне трения слоя с низким коэффициентом трения.

Режим 1: закалка на первичную твердость с 900 °С и последующий отпуск 250-300 °С.

Режим 2: закалка на вторичную твердость с 1050 °С и отпуск 550-600 °С.

3. Обоснование выбора инструментального сплава 180Х6ВФ5 для технологии литья в оболочковые формы для изготовления гранулирующих ножей экструдеров с малой производительностью до 1,5 т/час и сплава 260Х6ВФ9 для технологии литья по выплавляемым моделям для гранулирующих ножей высокой производительности более 3 т/час.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по пунктам: 1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов; 2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях; 3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов; 8. Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций;

**Достоверность результатов и выводов** обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, применением комплекса современных методов исследования, большим объемом экспериментальных данных, повторяемостью основных выявленных закономерностей.

Основные результаты работы представлены на следующих международных и всероссийских конференциях и семинарах: 3-я Всероссийская научно-практическая конференция (Бийск 2003); «The collection of reports of 15th International Metallurgical and Material Conference «METAL 2005» (Ostrava, 2005); IV Международная научно-техническая конференция «Современные техника и технологии» (Томск. 2008); XII научно-практическая конференция «Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты» (Кемерово 2009); X Всероссийская школа-семинар с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства-2010» (Томск 2010); Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии» (Москва 2010); Международная научно-практическая конференция «Техническая наука в мире: от теории к практике» ИЦРОН (Ростов-на-Дону 2014).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 5 в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций, 1 – в иностранных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 1 патент РФ.

### **Объем и структура работы**

Текст диссертации состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы, включающего 117 наименований, трех приложений. Всего 176 страниц, в том числе 79 рисунков, 5 формул и 16 таблиц.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы данной работы, приведены требования современной промышленности к новым материалам со специальными свойствами при грануляции пластических масс, сформулированы цели данного исследования. Показана практическая ценность и научная новизна полученных результатов.

**В первом разделе** приведены литературные данные о методах первичной грануляции полимеров и условия работы режущих инструментов. Рассмотрены принципы работы различных типов грануляторов, причины выхода из строя режущих инструментов. Определены условия работы гранулирующих ножей различной формы, применяемых для переработки полимеров. Проведен подробный анализ применяемых материалов, изучено влияние легирующих элементов в сплавах на характер выхода из строя ножей. Рассмотрены способы изготовления ножей, особое внимание уделено литейной технологии и способности легирования сплавов различными элементами, повышающими стойкость ножей при грануляции полимеров. Сделан вывод о применении литейной технологии как наименее затратной и дающей возможность использования отходов инструментального производства. На основании проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** дается обоснование выбора материалов для изучения процесса изготовления ножей и методов исследования, позволяющих оценивать полученные материалы в соответствии с условиями работы экструдеров и составом полимера. Сделано заключение, что наиболее перспективным легирующим элементом, повышающим износостойкость сплавов, является ванадий. Данный элемент несущественно повышает стоимость сплава, а при использовании литейной технологии хорошо усваивается и несложен при введении в сплав. В качестве основы для выплавки исследуемых сплавов выбраны два типа стали – углеродистая сталь марки У10 и среднелегированная сталь марки Х6ВФ. В данном случае сплавы на основе стали У10 позволяют оценить влияние только одного ванадия на структуру и свойства литых сплавов. Выбор стали Х6ВФ обоснован тем, что добавление ванадия в среднелегированной стали при наличии хрома и вольфрама позволяет исследовать влияние ванадия в комплексе с основными легирующими элементами инструментальных сталей на структуру и свойства сплавов. Сталь Х6ВФ широко применяется в инструментальном производстве, поэтому на предприятие постоянно скапливаются кусковые отходы. Дополнительное легирование сплавов ванадием достигало 10 %. Принят интервал введения в сплав по 2 % ванадия, для связывания его в карбиды увеличивали содержание углерода по 0,2 % на 1 % ванадия (таблица). Маркировку сплавов в дальнейшем осуществляли аналогично конструкционным сталям. Например, 140Ф2 соответствует 1,4 % углерода и 2 % ванадия.

Плавка сплавов велась в кислом тигле, отливка осуществлялась в оболочковые формы, вес отливки 15 кг. При плавке и отливке строго контролировалась температура расплава и состав.

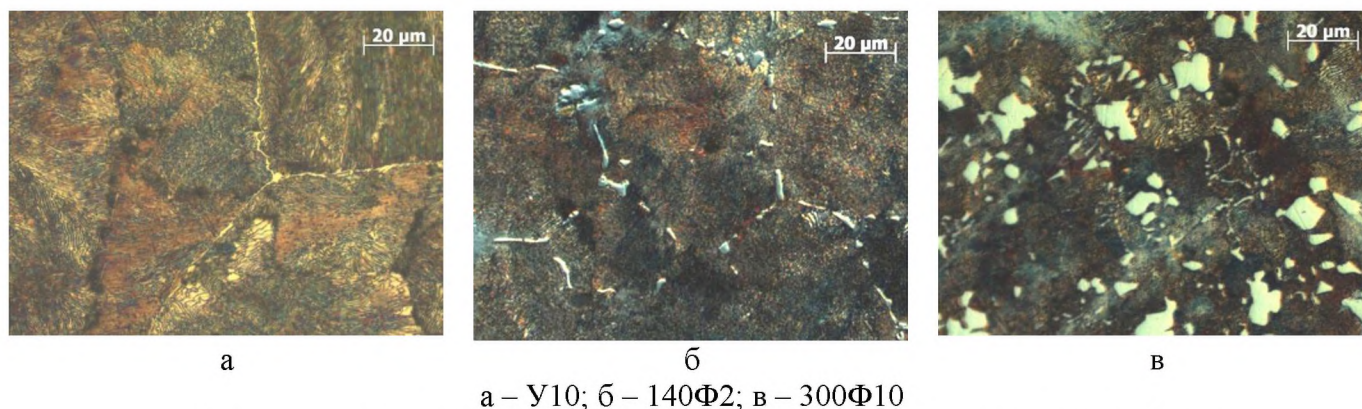
Образцы литых сплавов подвергались как предварительной, так и окончательной термической обработке в широком интервале температур.

Таблица – Химический состав и маркировка исследуемых сплавов

№ плавки	(маркировка)	Содержание элементов, % масс.						
		C	Si	Mn	Cr	W	V	Fe
1	У10	1,0 - 1,1	0,9 - 1,0	0,1 - 0,4	--	--	0	ост.
2	140Ф2	1,4 - 1,5					1,8-2,2	
3	180Ф4	1,8 - 1,9					3,8-4,2	
4	220Ф6	2,2 - 2,3					5,8-6,2	
5	260Ф8	2,6 - 2,7					7,8-8,2	
6	300Ф10	3,0 - 3,1					9,8-10,2	
7	Х6ВФ	1,0 - 1,1			5,5 - 6,5	1,1 - 1,5	0,5 - 0,8	
8	140Х6ВФ3	1,4 - 1,5					2,5 - 2,8	
9	180Х6ВФ5	1,8 - 1,9					4,5 - 4,8	
10	220Х6ВФ7	2,2 - 2,3					6,5 - 6,8	
11	260Х6ВФ9	2,6 - 2,7					8,5 - 8,8	
12	300Х6ВФ11	3,0 - 3,1					10,5 - 10,8	



**В третьем разделе** рассмотрено влияние различного содержания ванадия и углерода в литых углеродистых инструментальных сплавах на структуру и свойства. В результате анализа структуры литых сплавов после отливки было установлено, что с повышением содержания ванадия и углерода цементитная сетка разделяется на участки и при содержании ванадия более 4 % полностью разрушается с образованием обособленных карбидов. При содержании ванадия 8 % и более происходит образование карбидов ванадия специфической формы («лучистой», куба) (рисунок 1).



Твердость сплавов в литом состоянии с увеличением содержания ванадия возрастает от 27 HRC для У10 до 43,5 для 300Ф10, что обусловлено ростом объемной доли карбидов. Относительно низкая твердость литых сплавов объясняется тем, что при отливке в оболочковые формы скорость охлаждения не обеспечивает образования структуры мартенсита. Металлографическим анализом установлено, что металлическая основа представляет собой сорбито-трооститную структуру.

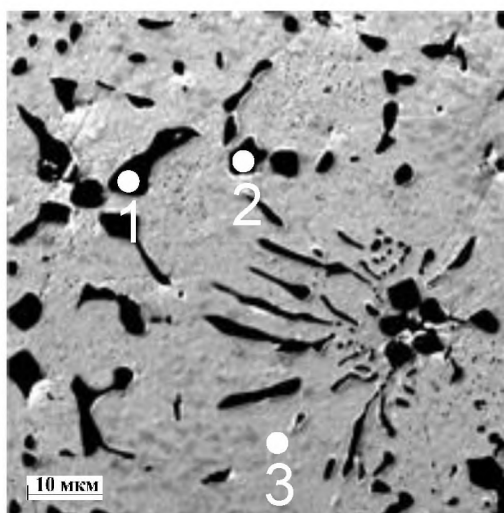
Установлено, что с повышением содержания ванадия и углерода в сплавах увеличивается количество карбидной фазы от 1 % для стали У10 до 19 % для сплава 300Ф10. При этом и средний размер карбидной фазы соответственно растет от 1 мкм до 3,8 мкм.

С целью изучения распределения ванадия между фазами литых сплавов был проведен МРСА (рисунок 2). Установлено, что ванадий содержится не только в карбидах (точки 1, 2), но и в металлической основе (точка 3). Независимо от количества введенного ванадия в составе сплава, образуются карбиды VC.

После отжига наблюдается снижение твердости до HRC 15 для У10 и HRC 34 для 300Ф10, это связано с коагуляцией, сфероидизацией карбидов, размер которых увеличивается в 1,5 раза.

В работе исследовался диапазон температур закали 800-1250 °С и отпуска 200-700 °С. Такой диапазон температур для данных сплавов необходим для растворения карбидов ванадия и легирования аустенита при закалке.

Изменение твердости сплавов в зависимости от степени легированности У10 и температуры нагрева под закалку представлено на рисунке 3.



- 1 – V 79,3%, Fe 2,59%, C 18,12%;  
 2 – V 78,2%, Fe 2,47%, C 19,33%;  
 3 – V 2,35%, Fe 84,87%, Si 1,51%, Mn 1,21%, C 10,06%

Рисунок 2 – Микроструктура и результаты МРСА сплава №5 (260Ф8)

При температурах закалки свыше 1000-1100 °С происходит существенное снижение твердости за счет повышения легированности аустенита ванадием и углеродом, что увеличивает его устойчивость.

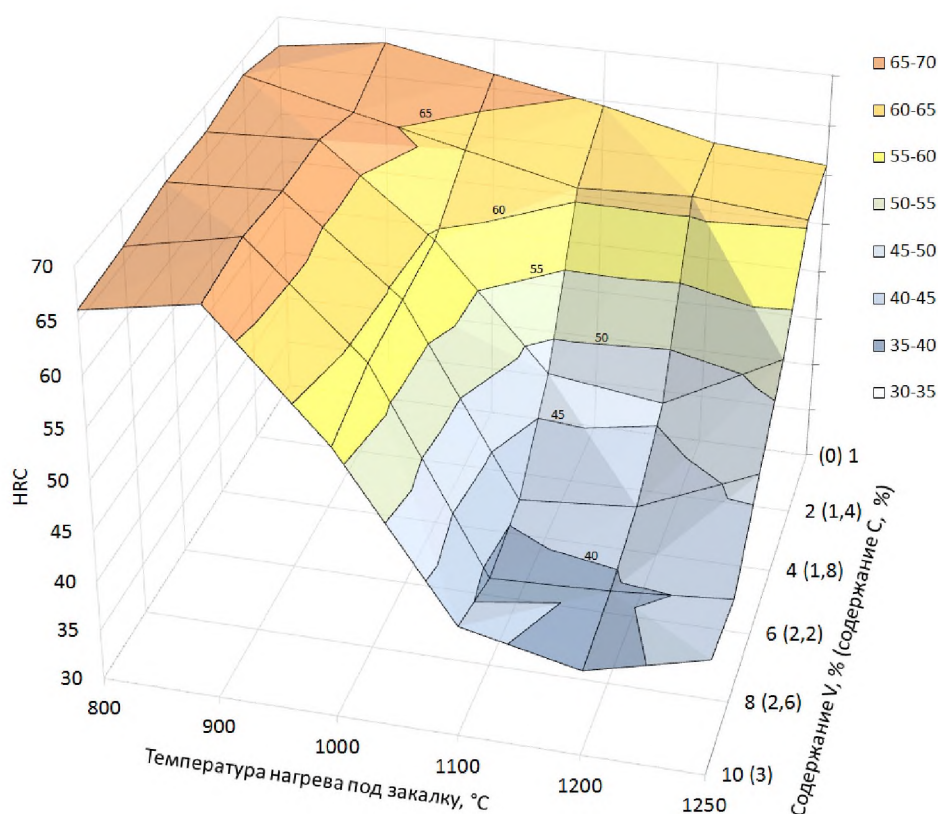
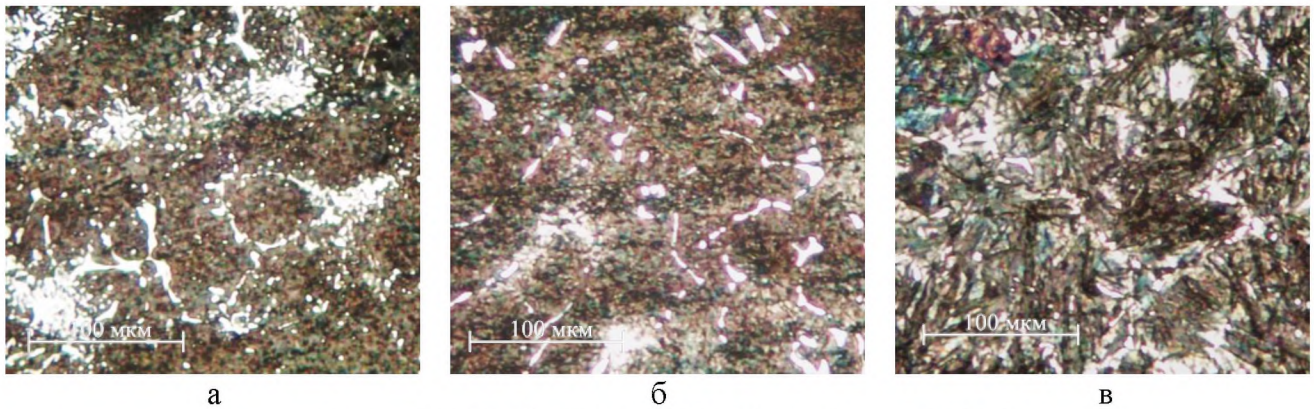


Рисунок 3 – Изменение твердости сплавов на основе отходов У10 в зависимости от температуры нагрева под закалку

Структура сплава после закалки с низких температур представляет собой мартенсит и карбиды (рисунок 4, а). Закалка с более высоких температур (рисунок 4, б) приводит к растворению мелких карбидов, однако перегрева не наблюдается. При температурах закалки 1200-1250 °С (рисунок 4, в) происходит значительное растворение карбидной фазы и образование крупноигльчатого мартенсита.





а –  $T_{\text{зак}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б –  $T_{\text{зак}} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в –  $T_{\text{зак}} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Рисунок 4 - Микроструктура сплава 180Ф4 после закалки

Сплавы с низким содержанием ванадия и сплавы, подвергнутые закалке с температур  $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ведут себя как углеродистые стали, то есть с повышением температуры отпуска твердость непрерывно снижается. Сплавы с высоким содержанием ванадия и углерода и сплавы, подвергнутые закалке с температур  $1100\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , закаливаются на «вторичную» твердость (рисунок 5), то есть в процессе отпуска при высоких температурах остаточный аустенит обедняется углеродом и ванадием и при последующем охлаждении превращается в мартенсит. Такая термическая обработка обеспечивает высокую твердость и теплостойкость.

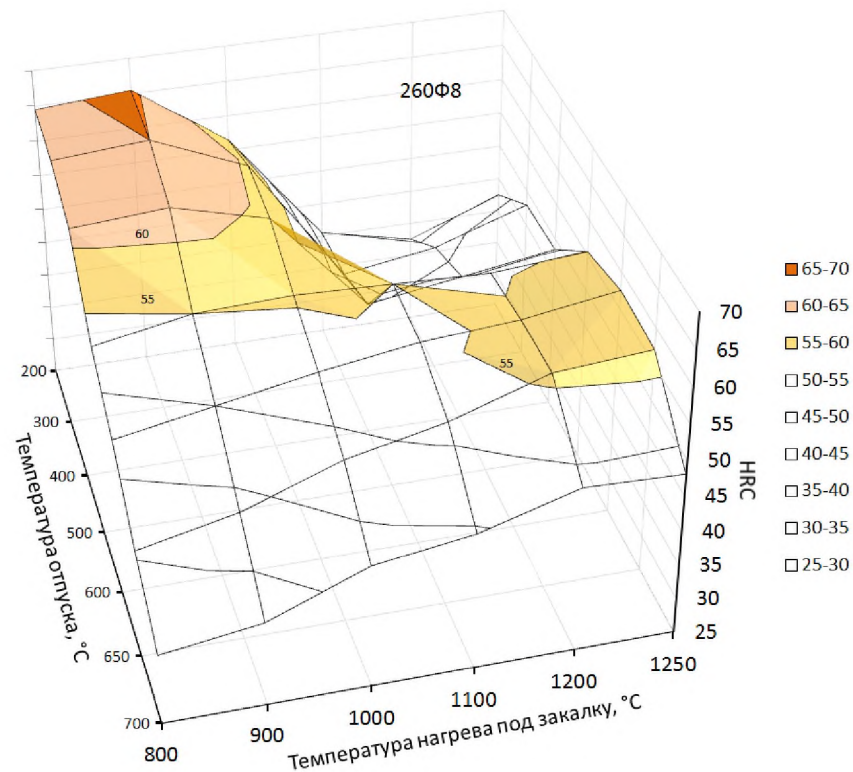


Рисунок 5 – Изменение твердости сплавов в зависимости от температуры отпуска

Для испытаний на трение и определение ударной вязкости использовались образцы, закаленные на «первичную» твердость (закалка с 800 °С, отпуск 200 °С), и образцы, закаленные на «вторичную» твердость (закалка с 1100 °С и 1200 °С, отпуск 600 °С).

Результаты испытаний показывают, что максимальное значение ударной вязкости при всех режимах термообработки имеют образцы с 4 % ванадия и образцы с 6 % ванадия после закалки с 1100 °С.

Проведенные испытания закаленных и отпущенных образцов на износостойкость показали, что для всех сплавов износостойкость повышается с увеличением содержания ванадия (рисунок 6).

Изучение поверхности износа образцов выявило, что поверхность трения представляет собой пленку оксидов (рисунок 7). Для сплавов с малым содержанием ванадия (до 4 %) оксидная пленка является неплотной, с элементами разрушения (рисунок 7, а). Для сплавов с высоким содержанием ванадия (260Ф8, 300Ф10) оксидная пленка сплошная, покрывающая всю поверхность с резкими полосами, оставленными твердыми частицами контртела (рисунок 7, б). Следов адгезионного разрушения не наблюдалось, что дает основание считать характер износа абразивно-окислительным. Отличие износостойкости углеродистой стали У10 и сплавов с малым содержанием ванадия и углерода от износостойкости сплавов с высоким содержанием ванадия и углерода (260Ф8) можно объяснить малой прочностью оксидной пленки и малым количеством карбидных включений, которые имеют высокую твердость.

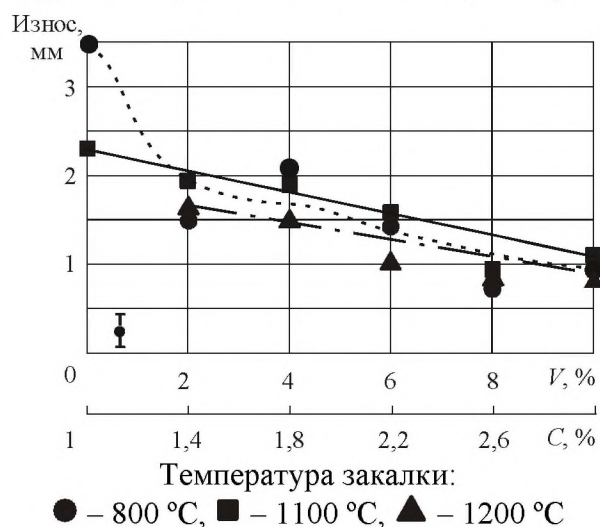
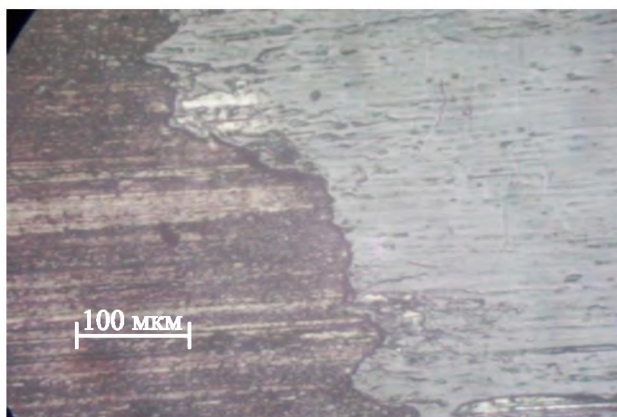
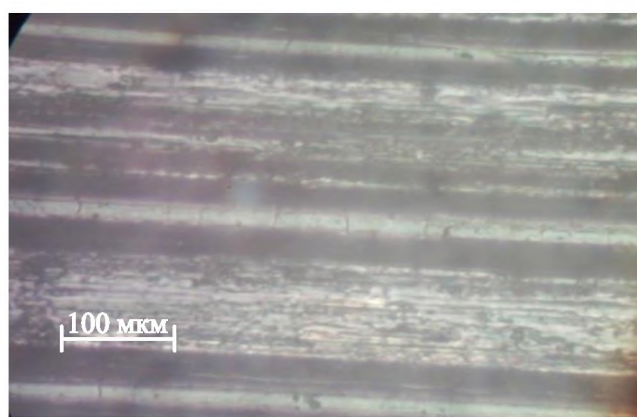


Рисунок 6 – Влияние содержания ванадия на износ сплавов



а



б

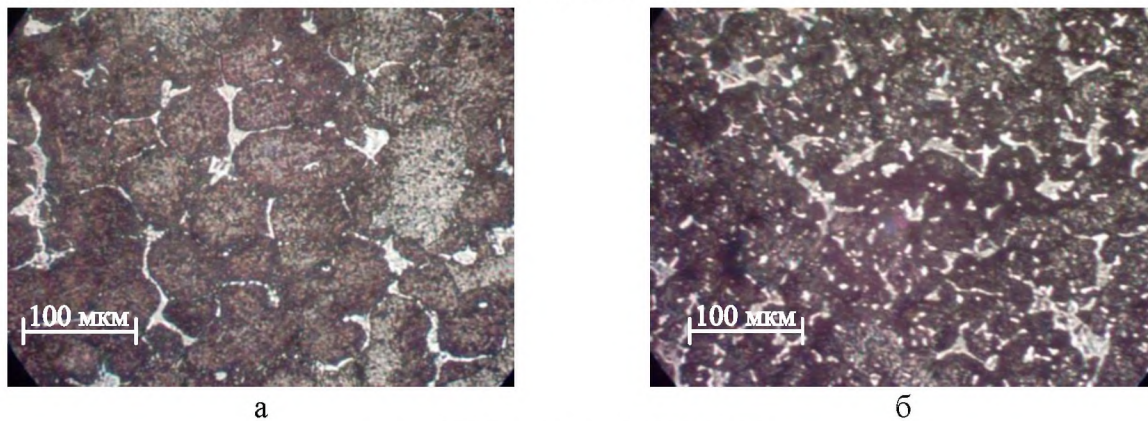
а – У10; б – 260Ф8

Рисунок 7 – Поверхности износа



**В четвертом разделе** рассмотрено влияние ванадия и углерода на структуру и свойства литых среднелегированных инструментальных сплавов на основе Х6ВФ.

Твердость в литом состоянии образцов с повышенным содержанием ванадия (8-10 %) достигает HRC 60, что объясняется наличием в структуре участков троосто-мартенситной смеси. После отжига твердость снизилась до HRC 20 для Х6ВФ и HRC 40 для 300Х6ВФ11.



а – 140Х6ВФ3; б – 260Х6ВФ9

Рисунок 8 – Микроструктура сплавов после отжига

В процессе отжига происходит распад троосто-мартенситной основы с образованием сорбита и карбидов. При высоком содержании ванадия в сплавах отсутствует сплошная ледебуритная сетка (рисунок 8, б), но объемная доля карбидной фазы (от 5 % для Х6ВФ до 28 % для 300Х6ВФ) и их размеры (от 2 мкм для Х6ВФ до 7 мкм для 300Х6ВФ) увеличиваются. После закалки сплавы с содержанием ванадия до 6 % приобретают высокую твердость лишь после нагрева до 1000-1050 °С; сплавы с большим содержанием ванадия, как при низких температурах закалки (850-950 °С), так и при высоких (1000-1050 °С) имеют высокую твердость (рисунок 9). Дальнейшее повышение температуры нагрева под закалку приводит к образованию остаточного аустенита и, как следствие, к снижению твердости. Действительно, при проведении последовательного отпуска в интервале температур 200-700 °С (рисунок 10) наблюдается повышение твердости после отпуска при температуре 550-600 °С, что связано с превращением остаточного аустенита в мартенсит.

Количественный металлографический анализ структуры показал, что с повышением содержания легирующих элементов объемная доля карбидной фазы растет, а с увеличением температуры нагрева под закалку количество карбидов в сплавах уменьшается (рисунок 11). Это связано с растворением карбидов хрома при температуре нагрева под закалку до 1050 °С, а при температуре 1250 °С – с частичным растворением карбидов ванадия. Результаты МРСА свидетельствуют о том, что в твердом растворе сплава 260Х6ВФ9 после закалки от температуры 1050 °С содержание хрома составляет 3,9 %, ванадия 0,9 % (точка 4, рисунок 12), а после закалки от температуры 1250 °С содержание хрома повышается до 4,7 %, а ванадия до 2,8 %.

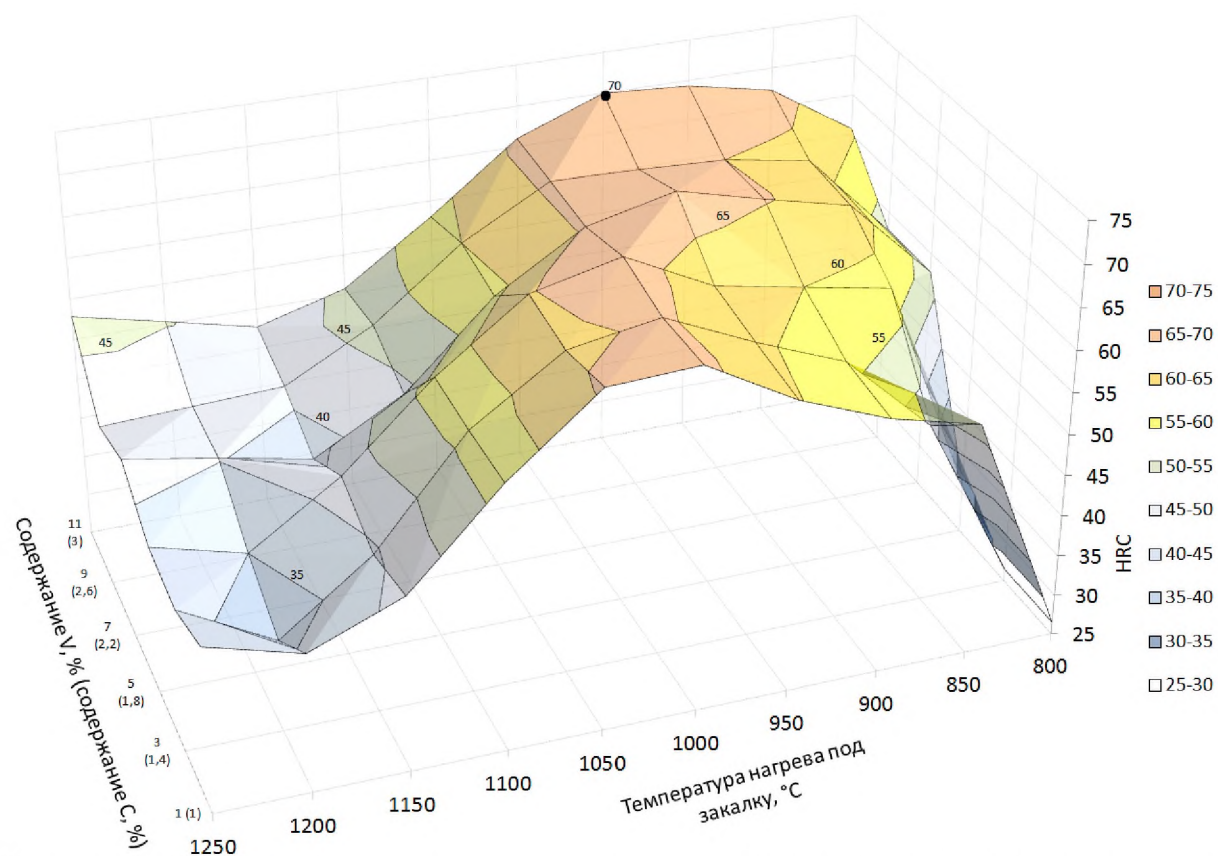


Рисунок 9 – Влияние температуры закалки на твердость сплавов на основе отходов стали Х6ВФ с различным содержанием ванадия

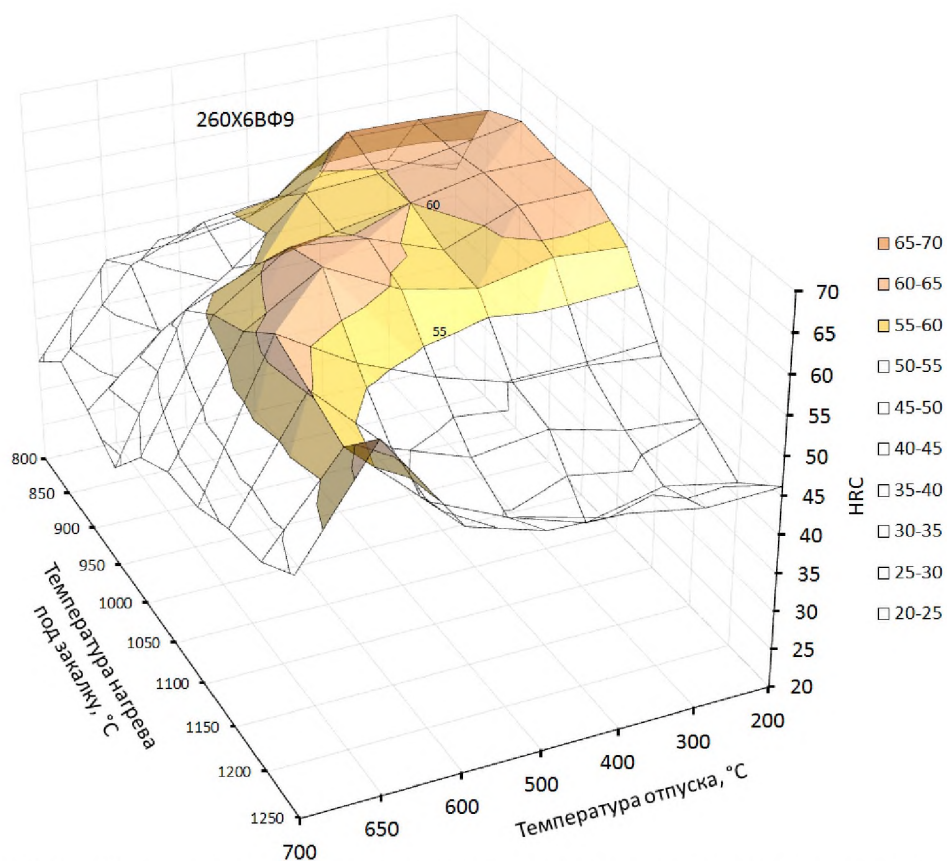
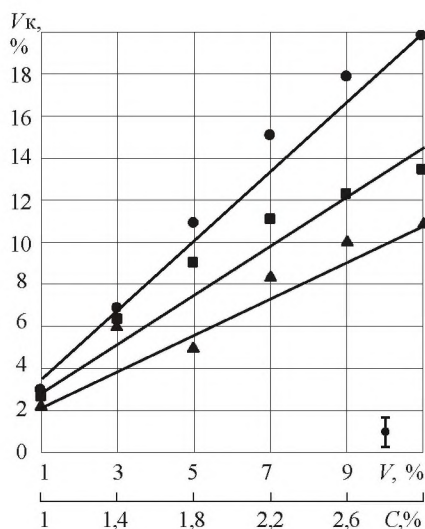


Рисунок 10 – Изменение твердости сплавов в зависимости от температуры отпуска





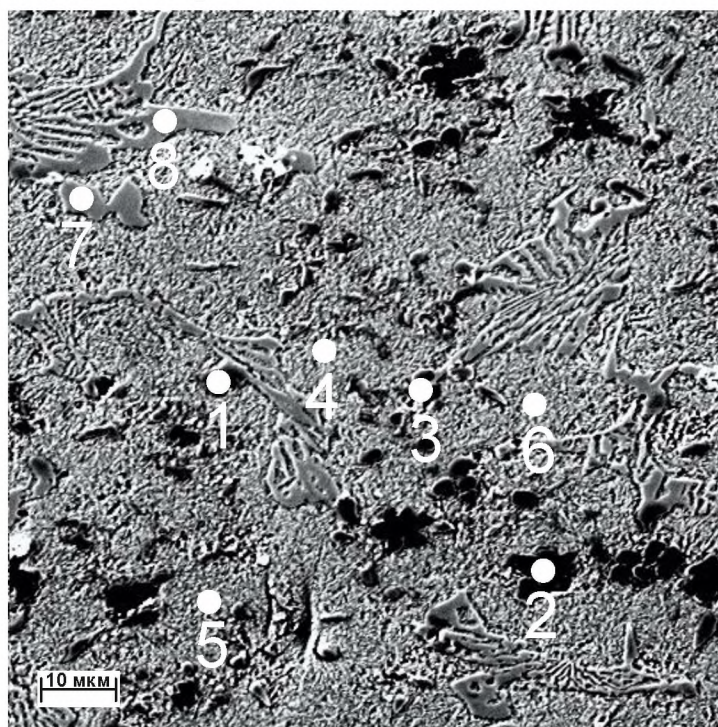
Температура закалки:

● – 800 °C; ■ – 1050 °C; ▲ – 1250 °C

Рисунок 11 – Зависимость объемной доли карбидной фазы от содержания ванадия

При повышении температуры закалки до 1200 °C карбиды ванадия частично растворяются и легированность твердого раствора увеличивается, что приводит к максимальному твердению при отпуске в области более высоких температур, но при этом уменьшается объемная доля карбидной фазы. Анализ структурных особенностей показал, что количество и распределение карбидов ванадия типа MC в форме «цветка», в состав которого ещё входят в небольших количествах вольфрам, хром и железо (точка 2, рисунок 12), при всех температурах закалки остается практически неизменным. При закалке с более низких температур оплавления ледебуритной эвтектики, в которой содержится наибольшее количество хрома (точка 7, 8,

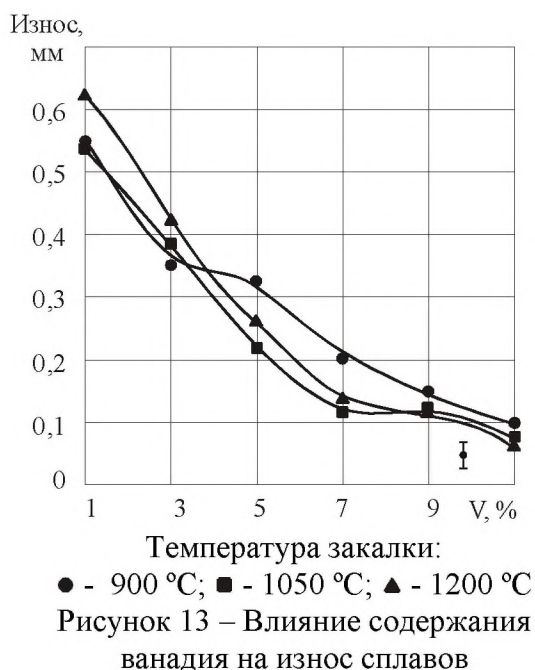
рисунок 12), не происходит, так как она была образована в результате первичной кристаллизации. Строение эвтектики имеет скелетообразную форму,



1 – Fe 1,4%; V 40,5%; W 1,3%; Cr 3,9%; C 52,9%. 2 – Fe 1,3%; V 46,0%; W 0,2%; Cr 2,9%; C 48,9%. 3 – Fe 2,0%; V 47,3%; W 0,8%; Cr 3,3%; C 46,4%. 4 – Fe 83,3%; V 0,9%; Cr 3,9%; Si 2,2%; Mn 1,1%; C 8,6%. 5 – Fe 73,7%; V 1,2%; Cr 3,8%; Si 1,9%; Mn 1,0%; C 18,0%. 6 – Fe 74,9%; V 2,6%; Cr 3,7%; Si 1,9%; Mn 1,0%; C 16,0%. 7 – Fe 33,7%; V 5,6%; Cr 15,5%; Mn 0,9%; C 44,3%. 8 – Fe 32,5%; V 6,3%; Cr 16,3%; Mn 0,6%; C 44,0%

Рисунок 12 – Микроструктура и результаты МРСА сплава 260X6BF9, закаленного с температуры 1050 °C



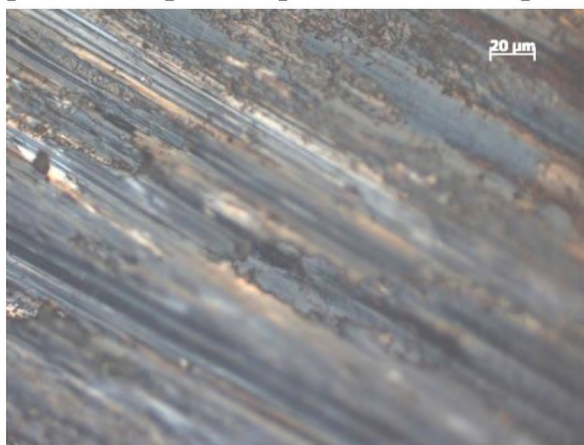


состоящую из крупных кристаллов. Химический состав ледебуритной эвтектики при всех температурах закалки не изменяется. Вольфрам в структуре в большем количестве находится в округлых темноокрашенных карбидах со светлой окантовкой (точка 1, рисунок 12), которые представляют собой карбиды типа  $M_6C$  с существенным замещением атомов железа атомами ванадия, хрома и вольфрама. Структура твердого раствора сплава, закаленного с более низких температур, представляет собой карбидо-мартенситную смесь различного состава (рисунок 12). При этом следует отметить, что основа сплавов имеет близкий состав и существенного перераспределения

элементов при закалке не происходит.

Результаты сравнительных испытаний износа литых сплавов на основе Х6ВФ, дополнительно легированных ванадием и углеродом, показаны на рисунке 13. Видно, что увеличение содержания ванадия приводит к значительному росту износостойкости. Значительного влияния на износостойкость температуры нагрева под закалку в интервале 1050...1200 °C не наблюдается. А при закалке с низких температур (от 800...900 °C) наблюдается повышенный износ.

На рисунке 14 приведен внешний вид изношенной поверхности сплавов с различным содержанием ванадия. Видно, что с увеличением легирующих элементов оксидная пленка из неплотной, отслаивающейся большими площадями (рисунок 14, а), переходит в плотную, которая разрушается под действием усталостных напряжений (рисунок 14, б). На поверхности зоны трения хорошо различимы дорожки карбидов. При трении наблюдается



а



б

а – Х6ВФ; б – 300Х6ВФ11

Рисунок 14 – Фотография изношенной поверхности сплавов с различным содержанием ванадия



частичное растворение карбидов, об этом можно судить по размеру последних и их округлой форме.

Как показали результаты металлографического анализа, более существенное влияние на износостойкость оказывает объемная доля карбидной фазы и наличие прочной оксидной пленки, возникающей при трении, а также легированность твердого раствора.

**В пятом разделе** представлены данные по выбору метода литья ножей из разработанных сплавов в зависимости от сложности их геометрии.

Плоские ножи, применяемые на малопроизводительных экструдерах (рисунок 15, а: 1 – экструдер ZSK-70SK, стреновая грануляция; 2 – экструдер ZSK-120, грануляция водяное кольцо; 3 – экструдер ZSK-83, подводная грануляция, фирмы «Werner & Pfleiderer», Германия; 4 – экструдер E2-125, подводная грануляция, фирмы «Trusioma», Германия), были изготовлены по разработанной технологии литья в оболочковую форму.



а



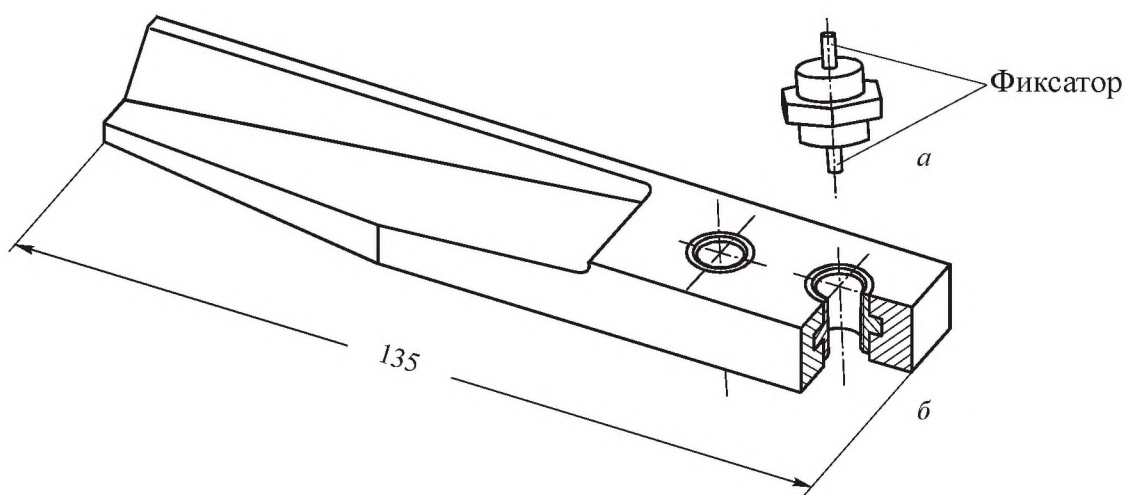
б

а - с низкой производительностью; б – с высокой производительностью

Рисунок 15 – Ножи для грануляции полимеров

При изготовлении ножей сложной формы, для высокопроизводительных экструдеров (рисунок 15, б: 1 – фирмы «Berstorff», Англия; 2 – ZSK-280, «Werner & Pfleiderer», Германия; 3 – E2-1500, «Trusioma», Германия; 4-6 – ЧПЗ20х10, «Большевик», Украина) применялся метод литья по выплавляемым моделям. Разработано и изготовлено более 10 пресс-форм. Для изготовления гранулирующих ножей с резьбовым креплением был разработан следующий технологический прием: перед запрессовкой парафина в пресс-форму устанавливались шестигранные вставки из стали 45 (рисунок 16, а). Отливка ножей из износостойких сплавов со вставками из конструкционной стали позволила значительно снизить затраты на сверление крепежных отверстий и нарезание резьбы (рисунок 16, б).

В разделе приводится расчет шихты предложенных сплавов на основе отходов инструментального производства и режимы термической обработки.



а – вставка; б – нож  
Рисунок 16 – Нож со вставкой

Изготовленные ножи прошли производственные испытания на «Гурьевском химическом заводе», ПАО «Казаньоргсинтез», ООО «ТОМСКНЕФТЕХИМ», ОАО «Ангарский завод полимеров», НТЦ «Полипластик», ЗАО «НПК» Полимер – Компаунд»; срок службы ножей превосходит в два и более раза импортные аналоги. По результатам производственных испытаний получено 3 акта внедрения. Проведен расчет ожидаемой годовой экономии для ООО «ТОМСКНЕФТЕХИМ» на один экструдер, которая составила 776 947 руб.

### Заключение

1. Проведено исследование литых сплавов на основе отходов сталей У10 и Х6ВФ, легированных ванадием до 10% и углеродом до 3%, отмечено:

- в сплавах на основе отходов стали У10 при введении ванадия более 2% и углерода более 1,2% наблюдается разрушение цементитной сетки, образуются карбиды ванадия типа МС «лучистой» формы, а пластинчатый перлит заменяется зернистым;
- установлено, что все структурные составляющие сплавов содержат ванадий. В процессе закалки легированность твердого раствора ванадием и углеродом повышается, за счет растворения карбидов при увеличении температуры нагрева под закалку;
- в сплавах на основе отходов стали Х6ВФ в литом состоянии образуется троосто - мартенситная структура, содержащая карбиды разных типов: МС, М<sub>6</sub>С, а также карбиды в составе ледебуритной эвтектики. После отжига в сплавах на основе отходов стали Х6ВФ в твердом растворе содержится не достаточно углерода, в связи с большим количеством легированных карбидов, что не дает требуемой твердости при закалке от 800 °С.

2. Установлены закономерности влияния углерода и ванадия и режимов термической обработки на свойства сплавов на основе отходов сталей У10 и Х6ВФ.

- установлено, что формирование мартенситной структуры при кристаллизации сплавов на основе отходов стали Х6ВФ приводит к увеличению твердости в 1,5 раза по сравнению с легированными ванадиевыми сплавами на основе отходов стали У10;
- определено, что повышение содержания ванадия до 4–5% и углерода до 1,8% повышает ударную вязкость литых сплавов, при этом температура нагрева под закалку влияет не значительно;
- установлено, что повышение содержания ванадия до 10% и углерода до 3% уменьшает средний коэффициент трения от 0,35 до 0,18 и увеличивает износостойкость. Это связано с увеличением объемной доли карбидной фазы, на поверхности изнашивания, которая имеет выступающий рельеф и повышает адгезию оксидной пленки.

3. Разработаны составы литых сплавов и режимы термической обработки для производства ножей используемых при грануляции полимеров. Обоснован выбор инструментального сплава 180Х6ВФ5 и технологии литья в оболочковые формы для изготовления гранулирующих ножей экструдеров с малой производительностью, до 1,5 т/час и сплава 260Х6ВФ9 и технологии литья по выплавляемым моделям для гранулирующих ножей высокой производительности, более 3 т/час. Показано, что закалка с температуры 900 °С и отпуск при температуре 200...300 °С может применяться для ножей, работающих без нагрева, а закалка от 1050 °С и отпуск при 600 °С – для ножей работающих с нагревом.

4. Проведены испытания в производственных условиях, которые показали, что все литые ножи, изготовленные из сплавов на основе отходов стали Х6ВФ, при грануляции полиэтилена и полипропилена показали высокую износостойкость и малое время приработки (от 0,5 до 2 часов), не вызывая износа фильеры.

Для переработки полиэтилена целесообразнее применять сплавы на основе отходов стали Х6ВФ с содержанием 3–5 % V, а для полипропилена и наполненных композиций сплавы с содержанием 7–11 % V.

5. Экономический эффект при применении гранулирующих ножей, изготовленных по литейной технологии, достигается за счет низкой себестоимости изготовления, снижения расходов на закупку импортного инструмента, а также затрат, связанных с переточкой ножей, роста объемов производства и повышения качества гранулируемого полипропилена.

Прогнозируемая годовая экономия на предприятии ООО «Томскнефтехим» составит 5 438 629 рублей.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

Проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований по определению возможности использования результатов диссертационных



исследований, при создании литого режущего инструмента со сложной гетерофазной структурой, высокая износостойкость которой обеспечивается крупными карбидными включениями. Перспективные направления применения таких материалов в современном производстве - обработка неметаллических материалов (каменного угля, графита, древесно-стружечных плит, сложноплавленных пластмасс).

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Экономическая выгода от применения специального сплава для ножей экструдера / А. С. Батурин, Е. И. Марр, Ю. П. Егоров, **О. М. Утьев** // Химическая промышленность. – 1992. – № 1. – С. 61.

2. Егоров, Ю. П. Термическая обработка литых сплавов с ванадием для гранулирующего инструмента / Ю. П. Егоров, **О. М. Утьев** // Обработка металлов. – 2003. – № 1. – С. 34–36.

3. Егоров, Ю. П. Компьютерный анализ структуры материалов / Ю. П. Егоров, **О. М. Утьев**, Н. В. Мартюшев // Обработка металлов. – 2003. – № 3. – С. 32–34.

4. **Утьев**, О. М. Использование отходов инструментального производства для изготовления гранулирующих ножей по переработке полимеров / **О. М. Утьев**, Ю. П. Егоров, А. Г. Багинский // Обработка металлов. – 2003. – № 4. – С. 30–33

5. Егоров, Ю. П. Особенности структуры литых высокоуглеродистых сплавов для гранулирующего инструмента, легированных ванадием / Ю. П. Егоров, **О. М. Утьев** // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/2. – С. 241–246.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, входящих в Web of Science или Scopus:

1. Baginski, A. G. The design of a die with a vacuum thermal insulation [Electronic resource] / A. G. Baginski, **О. М. Utyev**, Y. M. Kondratyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2015). – [012005, 4 p.]. – Title screen. – <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/33862>

Патенты на изобретения

1. Пат. № 2297307 РФ. Способ пайки литого инструментального сплава с конструкционной сталью [Текст] / А. Г. Багинский, Ю. П. Егоров, А. Г. Мельников, **О. М. Утьев**. – № 2006101011/02; заявл. 10.01.2016; опубл. 20.04.2007.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и труды научно-практических конференций:

1. Багинский, А. Г. «Восстановление фильер для грануляторов фирм «Бершторфф» и «Вернер Пфляйдер» / А. Г. Багинский, Ю. П. Егоров, **О. М.**

**Утьев** // Механика и машиностроение: сборник трудов. – Томск : ТПУ, 2000. – С. 47–48.

2. Martyushev, N. V. Computer analysis of the material structure // Vu. P. Egorov, **О. М. Утьев**. – Tomsk: TPU, 2002. – P.159–160.

3. **Утьев, О. М.** Изготовление гранулирующих ножей из отходов инструментального производства для переработки полимеров / **О. М. Утьев**, Ю. П. Егоров, А. Г. Багинский // 3-я Всероссийская научно-практическая конференция. – Бийск: АГТУ, 2003. – С. 66–69.

4. **Утьев, О. М.** Технологические особенности восстановления фильер для грануляции пластмасс / **О. М. Утьев**, Ю. П. Егоров, А. Г. Багинский // 3-я Всероссийская научно-практическая конференция. – Бийск: АГТУ, 2003. – С. 86–90.

5. Egorov, Y. P. Molded DURABLE ALLOYS ON THE BASIS OF IRON FOR MANUFACTURING OF INstrument of primary polimer granulation / Y. P. Egorov, A. Baginski, **О. М. Utiev** // METAL 2005:15th International Metallurgical and Material Conference (Ostrava, on May, 24th– 26th, 2005). – Czech Republic, Ostrava, 2005. – P. 216–220.

6. Мартюшев, Н. В Компьютерный анализ структуры материалов / Н. В. Мартюшев, Ю. П. Егоров, **О. М. Утьев** // Вестник УГТУ. – 2005. – № 10. – С. 83–86.

7. **Утьев, О. М.** Особенности износа литого инструментального сплава на основе Х6ВФ с повышенным содержанием ванадия // Современные проблемы машиностроения: труды IV Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 126–131.

8. **Утьев, О. М.** Изготовление инструмента первичной грануляции полимеров методом литья / **О. М. Утьев** // Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты: XII научно-практическая конференция. – Кемерово: [б. и.], 2009. – С. 176–178.

9. **Утьев, О. М.** Теплостойкость литых инструментальных сплавов на основе отходов инструментального производства с повышенным содержанием ванадия и углерода / **О. М. Утьев** // Новые материалы. Создание, структура, свойства-2010. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 312–315.

10. **Утьев, О. М.** Литые износостойкие сплавы на основе отходов инструментального производства для изготовления ножей первичной грануляции полимеров / **О. М. Утьев** // Новые материалы и технологии: сборник научных докладов. – М. : МАТИ, 2010. – С. 39–42.

11. **Утьев, О. М.** Литые высоколегированные сплавы с ванадием для изготовления инструмента, гранулирующего полимеры / **О. М. Утьев**, Ю. П. Егоров // Техническая наука в мире: от теории к практике: сборник научных докладов. – Ростов -на-Дону: ИЦРОН, 2014. – С. 34–43.