



European Commission
TEMPUS

The technological aspects of processing and remelting of dispersed metal scrap, generated during polishing and grinding of tools made from high speed steel and carbide and lump scrap for the manufacture of drilling equipment and mining equipment are investigated.

Д. М. КУКУЙ, Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, БНТУ, Л. В. СУДНИК, ИЛМ НАН Беларуси
УДК 669.14.018.252.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ПРОХОДЧЕСКОГО И БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Идея использования литейных технологий для изготовления инструмента и технологической оснастки, используемой в различных отраслях промышленности, является весьма привлекательной ввиду ряда технологических, эксплуатационных и экономических преимуществ [1–3].

В процессе производства ряда изделий образуется значительное количество отходов (инструментальное, гальваническое), содержащих дорогостоящие и дефицитные легирующие элементы (вольфрам, хром, молибден, ванадий, кобальт и др.), утилизация или рециклинг которых представляет определенную проблему. Вместе с тем, при условии осуществления определенных технологических операций после обработки такие отходы легко могут быть использованы в качестве шихтовых материалов при изготовлении путем переплава инструмента и технологической оснастки различного назначения, в том числе и для использования в качестве рабочих органов бурового и проходческого оборудования.

При изготовлении оснастки специального назначения литьем появляется уникальная возможность, используя в качестве шихтовых материалов отходы стандартных марок сталей, скорректировать в процессе плавки металла его состав, оптимизировать условия кристаллизации. Оптимизация состава и технологических факторов получения литых заготовок позволяет увеличить свойства, имеющие первостепенное значение с точки зрения эксплуатационной стойкости конкретной оснастки и условий ее работы.

В работе исследованы технологические аспекты переработки и переплава дисперсных металлоотходов, образующихся в процессе шлифования и затачивания инструмента из быстрорежущих

сталей и твердых сплавов и кускового лома с целью изготовления оснастки бурового и горнодобывающего оборудования. Внедрение такой технологии обеспечивает возможность рециклинга трудноперерабатываемых отходов, содержащих дорогостоящие и дефицитные элементы, позволяет предотвратить выброс их в отвалы и сохранить окружающую среду, а также увеличить срок службы изделий.

Поскольку для увеличения выхода годного металла технологией предусмотрено предварительное восстановление шлама путем смешивания с углеродсодержащими материалами (графит, древесный уголь и др.), весьма вероятно возможность значительного увеличения концентрации углерода в выплавленной стали [4].

Свойства исследуемых сплавов, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что увеличение содержания углерода способствует существенно возрастанию твердости, теплостойкости и износостойкости, но снижению ударной вязкости (табл. 1).

Таблица 1. Влияние содержания углерода на основные свойства литой быстрорежущей стали

Материал	Твердость HRC	Теплостойкость, 620 °С, 4 ч, HRC	Ударная вязкость КС, кДж/м ²	Износ, мг/ч
P6M5	63,0	58,5	90	78
P6M5 + 1,2 % C	69,0	64,0	20–30	45
P6M5 + 1,2 % C + модификатор	HRC 70	66,0	100–120	42
BK8	70	70	85	24

Изменение свойств вызвано увеличением количества карбидной составляющей в структуре (рис. 1, а, б). Причем зафиксировано увеличение как первичных изолированных карбидов, так и сет-

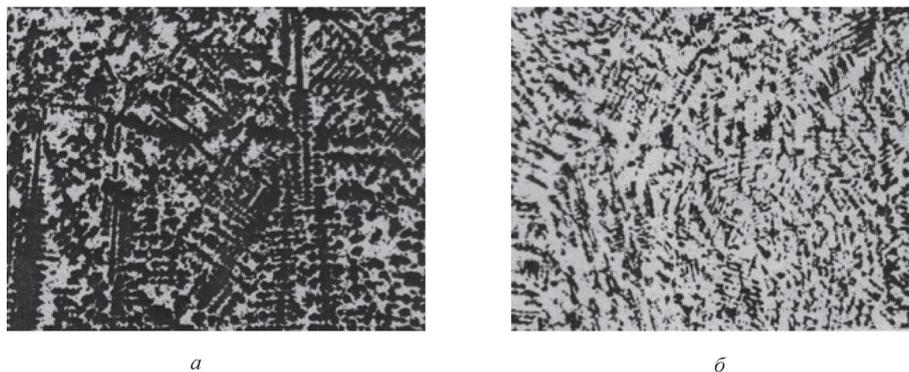


Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5: *а* – немодифицированная сталь Р6М5 с повышенным содержанием (2%) углерода; *б* – модифицированная сталь Р6М5 с повышенным содержанием (2%) углерода. $\times 400$

ки ледебуритной эвтектики, вызывающей охрупчивание стали.

Для устранения эффекта охрупчивания в результате повышенного содержания углерода предпринята попытка повышения ударной вязкости за счет модифицирования расплава, т. е. введения в состав стали в небольших количествах (до 0,1–0,15 %) специальных добавок-модификаторов. Эффект модифицирования заключается в том, что одни элементы увеличивают число центров кристаллизации в расплаве и, тем самым, количество растущих кристаллов, другие – ограничивают их рост, оказывая существенное влияние на свойства металла [5].

Металлографический анализ образцов исследуемых сталей показывает, что в результате модифицирующего эффекта происходит сильное измельчение первичного зерна. Значительные изменения фиксируются и в эвтектической составляющей. Она приобретает более тонкое, мелкодисперсное строение, местами разорвана и расположена в виде изолированных колоний (рис. 2, *а*). Действие модификатора объясняется его расположением на растущих кристаллах и твердого раствора и карбидной составляющей структуры (рис. 2, *б*). В результате таких изменений в структуре под воздействием модификатора ударная вязкость исследуемой

стали существенно растет. Примечательным является тот факт, что модификатор увеличивает также теплостойкость и износостойкость литой стали с повышенным содержанием углерода. Это связано, по-видимому, с повышением растворимости углерода и легирующих элементов в твердом растворе и, как следствие, усилением эффекта дисперсионного твердения.

Высокие значения твердости, теплостойкости и износостойкости в сочетании с весьма удовлетворительной ударной вязкостью литой быстрорежущей стали с повышенным содержанием углерода и твердых сплавов позволяют использовать разработанную технологию для изготовления заготовок технологической оснастки проходческого и бурового оборудования.

При использовании в качестве шихтовых материалов лома и стружки быстрорежущих сталей содержание углерода в выплавленном металле составляет 0,8–1,0%. В этом случае для повышения физико-механических и эксплуатационных свойств сталей и сплавов лучшим способом является использование микролегирующего действия элементов-модификаторов, среди которых одним из наиболее эффективных служит бор. Увеличение твердости и износостойкости стали, модифицированной бором, связано с появлением в структуре

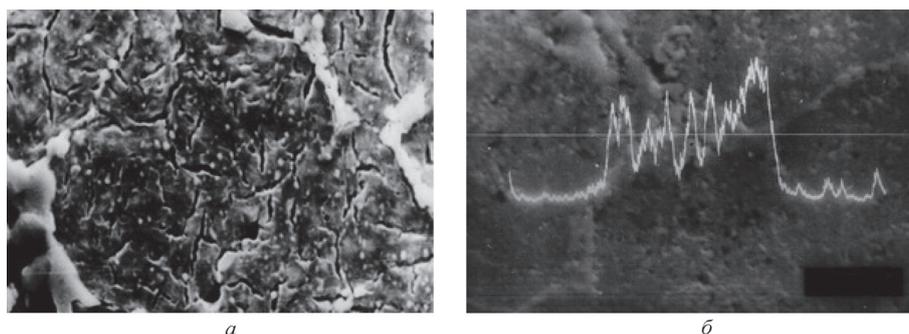


Рис. 2. Микроструктура модифицированной быстрорежущей стали и характер распределения модификатора в структуре: *а* – микроструктура модифицированной быстрорежущей стали с повышенным содержанием углерода после закалки и отпуска; *б* – характер распределения модификатора в структуре литой быстрорежущей стали. $\times 2500$

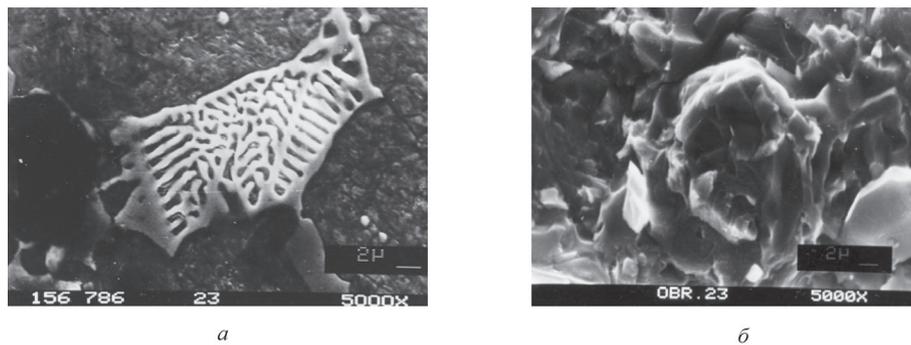


Рис. 3. Микроструктура (а) и поверхность разрушения (б) стали Р6М5Л, модифицированной бором. $\times 5000$

карбоборидов, обладающих высокой твердостью. Введение бора в составе ферросплава в металл способствует увеличению количества эвтектической составляющей преимущественно скелетной морфологии (рис. 3, а). Характер разрушения борсодержащей стали – межзеренный хрупкий (рис. 3, б).

Для устранения явления охрупчивания литой стали и сохранения ее высоких значений твердости, прочности и износостойкости изделий при проведении исследований бор вводили в расплав в виде наноструктурированного диборида титана. Выбор такого комплексного модификатора обоснован тем, что титан является эффективным инокулирующим элементом, диспергирующим структуру металла и повышающим его ударную вязкость (рис. 4), а размер частиц добавки не приводит к огрублению эвтектической составляющей при

условии соблюдения технологии плавки стали (перегрев, время выдержки расплава).

Диборид титана в виде нанопорошка вводили в печь с расплавленной сталью методом продувки его через футерованную фурму инертным газом (аргоном) после полного раскисления стали. Твердость образцов определяли непосредственно в литом состоянии, после отжига, закалки и отпуска (табл. 2). Ударную вязкость и износостойкость изучали после полной термической обработки (табл. 3). Микроструктура исследуемых образцов (рис. 5) свидетельствует о том, что в результате наномодифицирования измельчается первичное зерно, сетка ледебуритной эвтектики разрывается, эвтектика приобретает тонкое строение и располагается в виде изолированных колоний. Эвтектическая составляющая по морфологическому типу скелетообразная,

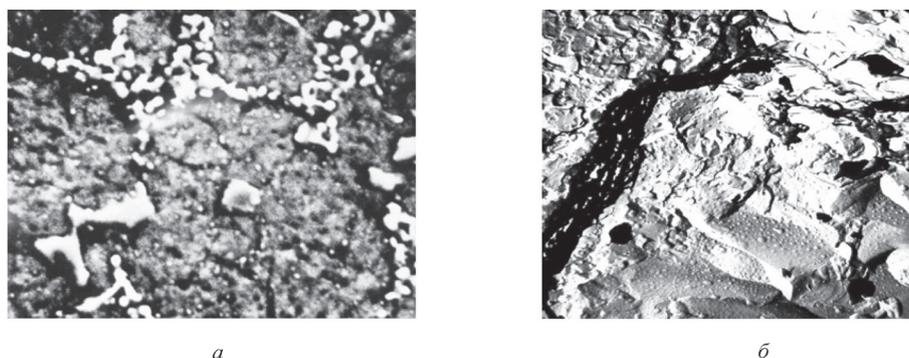


Рис. 4. Микроструктура (а) и поверхность разрушения (б) стали Р6М5, модифицированной титаном. а – $\times 850$; б – $\times 4000$

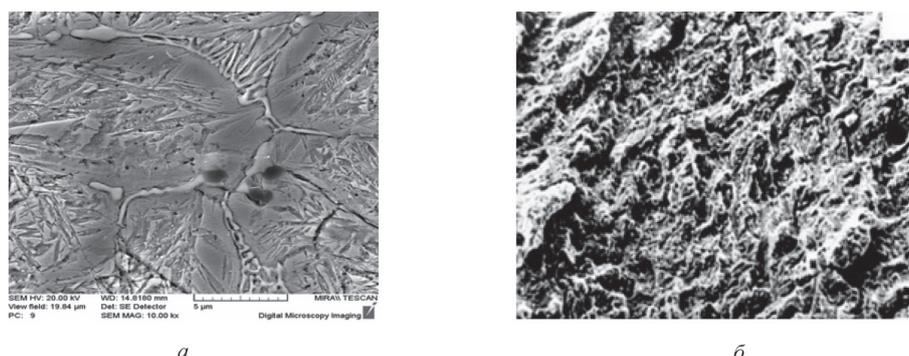


Рис. 5. Микроструктура (а) и поверхность разрушения (б) литой быстрорежущей стали Р6М5, модифицированной наноструктурированными добавками диборида титана. $\times 10000$

Т а б л и ц а 2. Влияние модифицирования на твердость стали Р6М5

Тип стали Р6М5	Твердость HRC				Теплостойкость HRC
	в литом состоянии	после отжига	после закалки	после отпуска	
Деформированная сталь	–	22	63	64	58
Литая сталь базового состава	65	26	63,5	64	59,5
Сталь, модифицированная титаном	65	28	62,5	63	58,5
Сталь, модифицированная бором	65	24	63,5	65	63
Сталь, модифицированная диборидом титана	65	24	63,5	65	63

Т а б л и ц а 3. Влияние модифицирования на количество неметаллических включений в структуре, ударную вязкость и износ стали Р6М5Л

Тип стали Р6М5	Ударная вязкость КС, кДж/м ²	Износ, мг/ч
Деформированная сталь	380	108
Литая сталь базового состава	90	78
Сталь, модифицированная титаном	160	67
Сталь, модифицированная бором	70	59
Сталь, модифицированная диборидом титана	180	50

что характерно для борсодержащей быстрорежущей стали. Однако механизм разрушения экспериментальной стали близок к механизму разрушения стали, модифицированной титаном – внутризеренный. На поверхностях разрушения экспериментальной стали, модифицированной диборидом титана (рис. 5, б), отсутствуют фасетки скола, присутствующие на фрактограммах борсодержащей стали (см. рис. 4, б). Напротив, в поверхностях разрушения наномодифицированной стали преобладает ямочный микрорельеф, что свидетельствует о высокой энергоёмкости такого механизма и высокой ударной вязкости металла.

В процессе проведения исследований в технологии производства литой оснастки проходческого и бурового оборудования использовали различные методы получения металла: индукционную плавку; электрошлаковый переплав; электрошлаковую тигельную плавку.

Для управления формированием структуры металла и достижения необходимого комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств использовали регулирование скорости охлаждения на разных стадиях кристаллизации путем применения материалов литейных форм с различной теплоаккумулирующей способностью в весьма ши-

роком интервале скоростей охлаждения от нескольких градусов (формы из стержневых смесей) до нескольких тысяч градусов в секунду (охлаждение в жидком азоте), а также модифицирование и наномодифицирование рядом элементов и их сочетаний.

В связи с высокой твердостью литых материалов и необходимостью сведения припусков на механическую обработку до минимальных размеров (0,1–0,15 мм) в технологии использованы точные методы получения заготовок – литье по постоянным моделям в керамические формы (Show-и Composite-Show-процессы). Их сущность заключается в том, что заранее приготовленная керамическая суспензия, содержащая огнеупорный наполнитель, связующее и катализатор, заливается на модель в опоку. После отверждения суспензии и извлечения модели форма прокаливается и заливается приготовленным сплавом. В качестве связующего опробованы гидролизированный этилсиликат и натриевое жидкое стекло.

Разработанные литые материалы по комплексу свойств могут найти широкое применение при изготовлении эффективной технологической оснастки бурового и горнодобывающего оборудования, по стойкости не уступающей твердосплавной.

Литература

1. Рудницкий Ф. И. Особенности эксплуатации инструмента из литой быстрорежущей стали // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч. 2. С. 173–177.
2. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Структура и свойства быстроохлажденной быстрорежущей стали Р6М5 // МиТОМ. 2003. № 5. С. 3–7.
3. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И., Мургаш М. Структурная наследственность и особенности разрушения быстрорежущих сталей // МиТОМ. 1997. № 2. С. 9–11.
4. Пат. РФ № 2277 / Ю. И. Тамбовцев, Ф. И. Рудницкий. Способ переработки металлоотходов.
5. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Влияние модифицирования на структуру и свойства литых вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталей // МиТОМ. 1989. № 2. С. 27–32.