



*Influence of molybdenum disulfide additives on anti-friction characteristics of powder fast-cutting steel produced by means of hot hydrostatic compression is studied.*

М. БЕЗНАК, А. С. ЧАУС, М. БАЙЧИЧАК, Словацкий технический университет

УДК 521.7: 621.9.02

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

**Введение.** Порошковую быстрорежущую сталь отличает пониженная карбидная неоднородность, поскольку особенности технологии сказываются в первую очередь на условиях распределения и размерах избыточных карбидов в структуре стали. Как следствие, такая сталь превосходит по прочности и вязкости быстрорежущую сталь обычного производства [1]. Порошковая сталь лучше шлифуется и меньше деформируется при термической обработке. Но самым главным преимуществом технологии является то, что методом порошковой металлургии можно изготавливать стали с высоким содержанием ванадия, что обеспечивает высокую износостойкость стали без ухудшения других эксплуатационных характеристик. Кроме того, открываются богатые возможности по использованию в процессе изготовления заготовок инструментов и деталей горячим изостатическим прессованием различного рода добавок, улучшающих трибологические свойства инструментального или конструкционного материала

[2–7]. В предлагаемой работе<sup>1</sup> рассматривается влияние добавок дисульфида молибдена на структуру и свойства, прежде всего износостойкость, быстрорежущей стали типа Р6М5, предназначенной для изготовления деталей скольжения аксиальных гидравлических усилителей. Выбор дисульфида молибдена обусловлен тем, что его добавка действует как твердый смазочный материал, что на стадии изготовления изделия улучшает прессуемость порошка, а при эксплуатации уменьшает интенсивность абразивного изнашивания в условиях сухого трения скольжения [1, 2].

**Методика проведения исследований.** Экспериментальные образцы получали горячим изостатическим прессованием порошка быстрорежущей стали типа Р6М5 (рис. 1) с добавками 1,8, 2,5 и 3,0 мас. %  $\text{MoS}_2$  при температуре 1150 °С при давлении 110 МПа в течение 90 мин. Выбор такого диапазона концентраций добавок дисульфида молиб-

<sup>1</sup> Работа выполнена благодаря финансовой поддержке по проекту VEGA № № 1/0383/10.

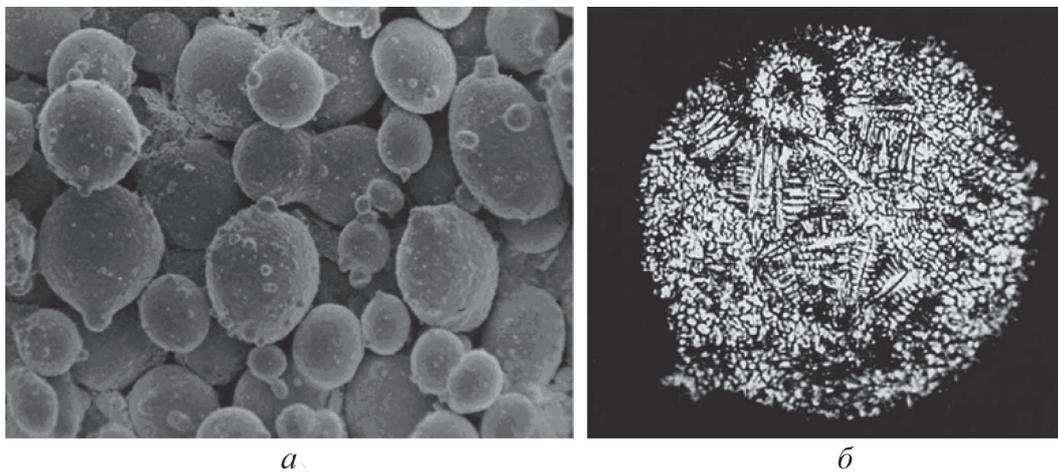


Рис. 1. Морфология (а) и микроструктура (б) порошковых частиц стали типа Р6М5, фракция 63 мкм

дена обусловлен тем, что в меньших количествах (до 1 мас. %) они эффективны только с точки зрения улучшения технологичности прессования, в то время как влияние больших добавок  $\text{MoS}_2$  на износостойкость порошковой быстрорежущей стали до настоящего времени является малоизученным.

После изостатического прессования заготовки подвергали смягчающему отжигу при температуре  $860^\circ\text{C}$  в течение 3 ч с последующим охлаждением со скоростью  $25^\circ\text{C}/\text{ч}$  на температуру  $600^\circ\text{C}$ , а затем с охлаждением заготовок на открытом воздухе до комнатной температуры.

После отжига и механической обработки экспериментальные образцы сталей подвергали закалке и отпуску. При закалке осуществляли предварительный подогрев до  $400^\circ\text{C}$  с выдержкой 30 мин в электрической печи без защитной атмосферы, затем до температуры  $500^\circ\text{C}$  в течение 5 мин в ванне  $72\% \text{BaCl}_2 + 28\% \text{NaCl}$ . Третий подогрев при температуре  $900^\circ\text{C}$  с выдержкой 5 мин и окончательный нагрев при температуре  $1160^\circ\text{C}$  в течение 1 мин были осуществлены в ванне  $95\% \text{BaCl}_2 + 5\% \text{MgF}_2$ . Охлаждение образцов осуществляли при температуре  $560^\circ\text{C}$  в расплаве солей  $50\% \text{BaCl}_2 + 25\% \text{NaCl} + 25\% \text{KCl}$ , а затем в масле с комнатной температурой. Трехкратный отпуск проводили при температуре  $560^\circ\text{C}$ . После полной термической обработки образцы подвергали финишной механической обработке – шлифованию.

Износостойкость стали с добавками сульфида молибдена оценивали по потере массы в единицу времени в результате истирания при сухом трении скольжения при скорости скольжения в интервале от 0,1 до 1 м/с с нагрузкой от 1 до 15 МПа по схеме «полый диск в полном диске». Схема используемой в приборе Tribotestor пары скольжения показана на рис. 2. Наружные втулки были изготовлены из экспериментальных сталей, подвергнутых термической обработке по приведенным выше режимам, а внутренние, служащие контртелом, – из закаленной конструкционной стали типа 40Г с твердостью 60 HRC. В качестве сравнительного эталона использовали специальную износостойкую (в условиях повышенных давлений) бронзу (содержание меди 84%), легированную 9% алюминия, 5% никеля и 1% железа и 1% марганца. Параллельно определяли коэффициент трения в зависимости от скорости скольжения 0,1, 0,5, 1,0 и 2,0 м/с при нагрузке в интервале от 1 до 15 МПа.

Перед началом каждого эксперимента на приборе Tribotestor каждая трибологическая пара была вначале приработана при постоянной нагрузке 0,5 МПа в течение 20 мин, а затем нагрузка повышалась через каждые 10 мин на 0,5 МПа до пре-

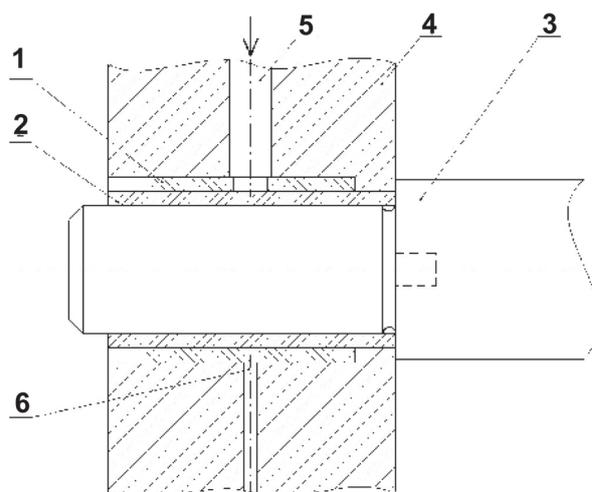


Рис. 2. Трибологическая пара для определения коэффициента трения и износостойкости: 1 – наружная втулка; 2 – внутренняя втулка; 3 – вращающийся вал; 4 – зажимное устройство; 5 – канал для подвода масла; 6 – отверстия для датчика температуры

дельного в эксперименте значения 15 МПа. Износостойкость оценивали по потере массы экспериментальных образцов размерами  $10 \times 10 \times 50$  мм, изготовленных из эталонного материала и исследуемых быстрорежущих сталей с добавками дисульфида молибдена при трении скольжения без смазочного материала стального диска из закаленной конструкционной стали типа 40Г с твердостью 60 HRC об образцы из исследуемых сталей при нагрузке 100 кПа и скорости скольжения от 0,5 до 1 м/с в течение 20 мин. Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре фирмы PHILIPS.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Выполненные металлографические исследования с использованием оптического и электронного растрового микроскопов показали, что добавки дисульфида молибдена в количестве от 1,8 до 3,0% практически не оказывают заметного влияния на структуру порошковой стали базового химического состава. Типичная структура после отжига стали с добавкой 1,8%  $\text{MoS}_2$  приведена на рис. 3. Структуру отожженной стали отличает высокая плотность вторичных карбидов прежде всего эвтектоидного происхождения, на фоне которых наблюдаются более крупные частицы первичных (эвтектических) карбидов. Карбидная составляющая, по данным рентгеноструктурного анализа, представлена фазами MC (на базе карбида ванадия VC) и  $\text{M}_6\text{C}$  типа  $\text{Fe}_3(\text{W}, \text{Mo})_3\text{C}$ . Следует отметить, что в отожженном состоянии дисульфида молибдена практически структурно неразличимы.

Иная картина наблюдается в экспериментальных быстрорежущих сталях после полной термической обработки (закалки и отпуска), что проиллюстриро-

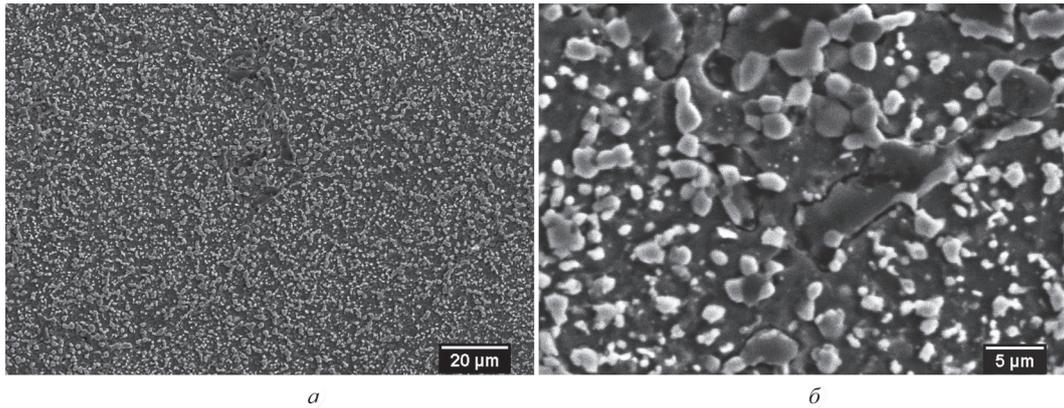


Рис. 3. Структура порошковой быстрорежущей стали с добавкой 1,8% MoS<sub>2</sub> после отжига: *a* – общий вид; *б* – фрагмент структуры

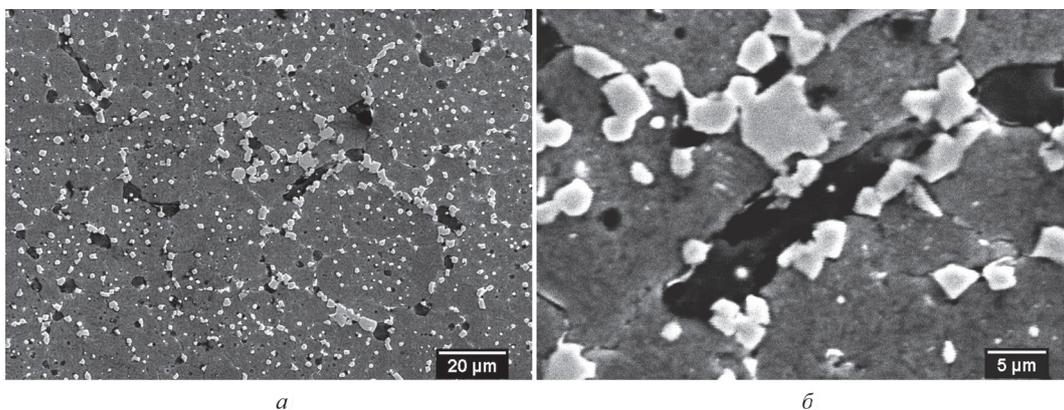


Рис. 4. Структура порошковой быстрорежущей стали с добавкой 3% MoS<sub>2</sub> после полной термической обработки: *a* – общий вид; *б* – фрагмент структуры

вано на примере стали с добавкой 3% MoS<sub>2</sub> (рис. 4). Из рисунка видно, что частицы MoS<sub>2</sub> сконцентрированы, главным образом, по границам первичных зерен матрицы, где они находятся в местах скопления между более крупными карбидными частицами первичного происхождения. Кроме того, частицы MoS<sub>2</sub> наблюдаются и по границам действительных аустенитных зерен. Такой характер распределения, вне всякого сомнения, является следствием высокой поверхностной активности дисульфида молибдена.

Трибологические эксперименты показали, что добавки сульфида молибдена в порошковую быстрорежущую сталь уменьшают коэффициент трения при сухом трении скольжения по сравнению с эталонным образцом, причем это преимущество над эталонным материалом становится более ощутимым при более тяжелых условиях испытаний, а именно при высших нагрузках, начиная от 12 МПа и скоростях скольжения, больших, чем 1 м/с. Влияние используемой нагрузки на коэффициент трения при постоянной скорости трения скольжения 1 м/с без смазки для различного количества добавок MoS<sub>2</sub> показано на рис. 5. Характер изменения температуры в зоне трения в зависимости от вре-

мени приведен на рис. 6. Уменьшение коэффициента трения и температуры в зоне трения под воздействием дисульфида молибдена способствует по-

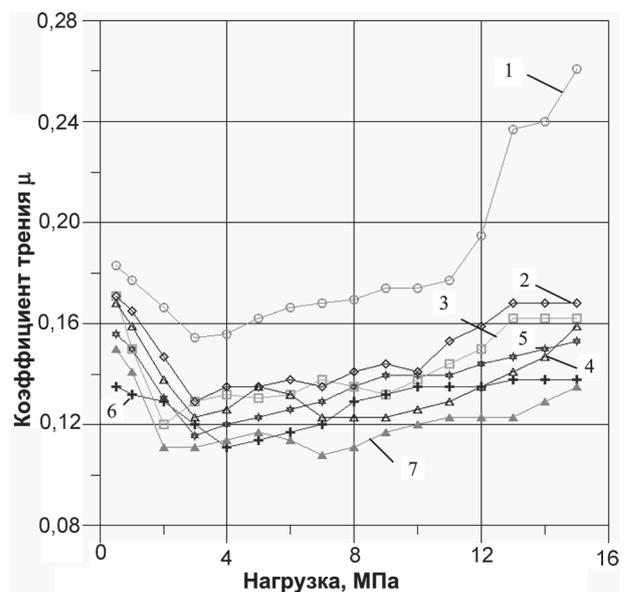


Рис. 5. Влияние нагрузки на коэффициент трения (при скорости трения скольжения 1 м/с без смазки) для различного количества добавок: 1 – эталон; 2 – добавка 1,8% MoS<sub>2</sub>; 3 – 2,0; 4 – 2,2; 5 – 2,5; 6 – 2,8; 7 – 3,0% MoS<sub>2</sub>

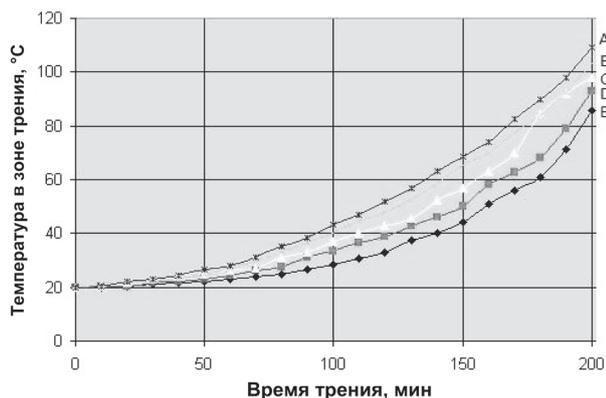


Рис. 6. Влияние времени испытаний на температуру в зоне трения (при скорости трения скольжения 1 м/с без смазки) для различного количества добавок: А – эталон; В – добавка 1,8% MoS<sub>2</sub>; С – 2,0; D – 2,5; E – 3,0% MoS<sub>2</sub>

вышению износостойкости порошковой быстрорежущей стали (рис. 7). Причем фрактографический анализ поверхностей разрушения экспериментальных образцов свидетельствует о достаточно вязком характере разрушения порошковой стали, особенно после полной термической обработки [3].

**Вывод.** Процесс горячего изостатического прессования порошков с добавками веществ,

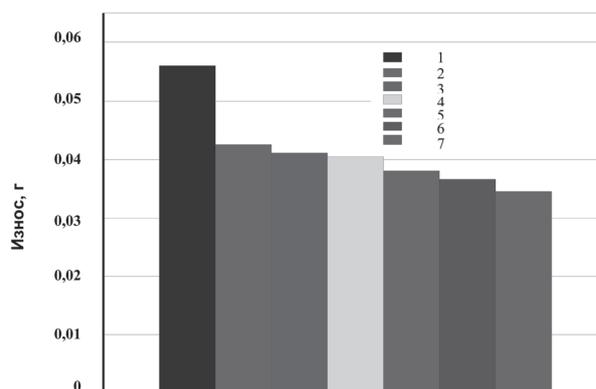


Рис. 7. Влияние количества добавок MoS<sub>2</sub> (при нагрузке 100 кПа и скорости трения скольжения 1 м/с без смазки) на износостойкость: 1 – эталон; 2 – сталь с добавкой 1,8%; 3 – 2%; 4 – 2,2; 5 – 2,5; 6 – 2,8; 7 – 3,0% MoS<sub>2</sub>

играющих роль внутренней смазки и уменьшающих их коэффициент трения, может быть использован для повышения износостойкости быстрорежущей стали типа Р6М5. Использование таких материалов может быть особенно актуальным при работе в условиях сухого трения скольжения при повышенных нагрузках скоростях скольжения.

### Литература

1. Гелин Ф. Д., Чаус А. С. Металлические материалы. Мн.: Выш. шк., 2007.
2. Ковалевский В. Н., Комаров О. С., Чаус А. С. и др. Технология конструкционных материалов. 2-е изд. Мн.: Новое знание, 2007.
3. Bezák M. Tvrdé klzné materiály pripravené nekonvenčnou metalurgiou. Bratislava: ZTS UTAR, 1980.
4. Hvalda A. Prášková metalurgia. Bratislava: STU, 2000.
5. Zábavník V. Technické materiály. Košice: ALFA, 1995.
6. Lukáč I. Spracovanie práškových kovov. Košice: VŠT, 1989.
7. Blaškovič P., Balla J., Dzimko M. Tribológia. Bratislava: ALFA, 1990.