

В.Н. Терехов, вед. научный сотрудник

В.И. Канюка, зав. лабораторией

А.Н. Мороз, научный сотрудник

Н.А. Рябухина, инженер

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕПЛОСТОЙКОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

ГП «УкрНИИ Спецсталь», г. Запорожье

Вивчено вплив легування кобальтом, хромом, титаном, кремнієм, вольфрамом, молибденом та вуглецем на структуру та властивості сталі підвищеної теплостійкості з інтерметалідним зміцненням для різання важкооброблюваних матеріалів. Розроблено склад нової високоефективної сталі 3В9М10К16.

Изучено влияние легирования кобальтом, хромом, титаном, кремнием, вольфрамом, молибденом и углеродом на структуру и свойства стали повышенной теплостойкости с интерметаллидным упрочнением для резания труднообратываемых материалов. Разработан состав новой высокоэффективной стали 3В9М10К16.

Введение. Возрастание удельной доли сплавов со специальными свойствами в общем объеме материалов, подвергаемых резанию, повышает актуальность проблемы создания новых высокопроизводительных инструментальных сталей. Процесс резания труднообрабатываемых материалов (титановые и никелевые сплавы, жаропрочные и нержавеющие стали) характеризуется большими тепловыми и силовыми нагрузками на инструмент, приводящими к его интенсивному износу. Возможность повышения теплостойкости сталей с карбидным упрочнением в настоящее время практически исчерпана. Решение задачи лежит на пути перехода к сталям с интерметаллидным или смешанным карбидно-интерметаллидным упрочнением. В результате комплекса исследований, проведенных Ю.А. Геллером и В.А. Бростремом [1,2] была разработана группа сталей типа В18М7К25, В14М7К25, В11М7К23 (ЭП831), обладающих высокой теплостойкостью (≥ 700 °С) и высокотемпературной прочностью, которые хорошо зарекомендовали себя в промышленных условиях при резании никелевых и титановых сплавов. Характерной особенностью этих материалов является присутствие в их составе 18...25 % в сумме вольфрама и молибдена, а также 22...25 % кобальта. К их недостаткам, помимо повышенного содержания дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, относится также низкая технологическая пластичность, которая существенно затрудняет металлургический передел данных сталей и отрицательно влияет на выход годного.

Постановка задачи. Задачей проведенных исследований является изыскание состава стали, которая по эксплуатационным характеристикам не уступает стали В11М7К23, но более экономно легирована и обладает лучшими технологическими характеристиками. С этой целью изучали влияние на свойства стали легирования кобальтом, хромом, титаном, кремнием, вольфрамом, молибденом, углеродом и проводили выбор оптимального количества и соотношения указанных элементов.

Методика проведения исследований. На различных этапах работы использовали разные схемы постановки экспериментальных исследований. При изучении влияния углерода (0,25...0,45 %), хрома (2,5...7,5 %) и титана (1,5...3,5 %) на структуру и свойства сталей типа В9М7К8Ф2 применяли метод математического планирования эксперимента с полурепликой типа 2^{3-1} . Этот же метод использовали для определения влияния титана (1...3 %), кобальта (13...17 %) и кремния (0,2...2,0 %) на свойства стали с матрицей типа

ЗВ9М11. Отдельная серия экспериментов была посвящена изучению влияния на стали с основой 2Х3К17ФТ соотношения между количеством вольфрама и молибдена при их суммарном содержании около 20 %. Исследовали также влияние углерода (0,10...0,30 %) на структуру и свойства стали типа В11М7К17.

Опытные стали выплавляли в открытой индукционной печи и разливали в слитки массой 20 или 50 кг. Режим отжига деформированного металла: нагрев до температуры 860...880 °С, выдержка 3 ч, охлаждение со скоростью ≈ 70 град/ч до температуры 500 °С и далее – на воздухе. Температурные интервалы $\alpha \Rightarrow \gamma$ ($\gamma \Rightarrow \alpha$) превращений исследованных материалов определяли с использованием высокочувствительного дилатометра на основе механотрона. Выявление структуры проводили путем травления в 4 %-ом растворе азотной кислоты, спирте и «царской водке» (1 часть HNO_3 и 3 части HCl). Избыточные фазы выделяли в электролите, состоящем из 20 г хлористого калия, 50 см³ соляной кислоты плотностью 1,19 г/см³, 50 г лимонно-кислого аммония и 1000 см³ воды. Плотность тока составляла 0,03...0,05 А/см², продолжительность электролиза – 2 ч. После промывки анодный осадок обрабатывали «царской водкой» до полного окисления карбидов, раствор после добавления 10...15 см³ серной кислоты плотностью 1,84 г/см³ выпаривали до появления паров H_2SO_4 . После растворения образовавшихся солей в воде определяли концентрацию всех элементов, присутствующих в анодном осадке, за исключением вольфрама. Содержание вольфрама определяли фотокалориметрическим методом с использованием оптической металлографии и оптической растровой микроскопии (прибор «Стереоскан 4»).

Прочность при изгибе и ударную вязкость определяли на образцах размерами 6 x 6 x 50 мм (база испытаний – 40 мм, сосредоточенное нагружение) и 10 x 10 x 55 мм (без надреза) соответственно. Теплостойкость исследованных сплавов определяли как максимальную температуру дополнительного (после полной термической обработки) отпуска, после которого твердость стали составляла не ниже HRC 58.

Результаты исследований

Влияние кобальта. Как было показано Геллером и Бростремом, в безугле-родистых составах снижение содержания кобальта до 20 % вызывает в структуре появление δ -феррита, оказывающего отрицательное влияние на свойства стали. Существенного снижения содержания этого элемента можно достичь путем дополнительного легирования стали, например углеродом. Введение 8 % кобальта положительно сказывается на растворимости вольфрама и молибдена в матрице при закалке и позволяет повысить твердость модельного сплава типа 1В9Т после закалки и отпуска на 50 HV, твердость сплава типа 1М6Т – на более 100 HV. При этом на положение оптимума старения (температура 700 и 650 °С соответственно) введение кобальта не оказывает влияния. Однако такое количество данного элемента оказывается недостаточным для достижения необходимого уровня твердости. Повышение содержания кобальта до 14...17 % при суммарном содержании вольфрама и молибдена около 20 % позволяет достичь максимального уровня вторичной твердости, равного 65...66 HRC. Изменение содержания кобальта в указанных пределах положительно сказывается на максимальном уровне вторичной твердости стали и прочности при изгибе, но отрицательно влияет на ее сопротивление тепловому разупрочнению. Последнее обстоятельство делает нецелесообразным дальнейшее повышение вторичной твердости стали (до 68...69 HRC) путем увеличения количества кобальта до 18...19 %.

Еще одно ограничение на содержание кобальта в стали связано с вытеснением ним атомов вольфрама и молибдена из раствора, перераспределяя их, преимущественно, к дефектам кристаллической решетки. При превышении некоторых критических параметров

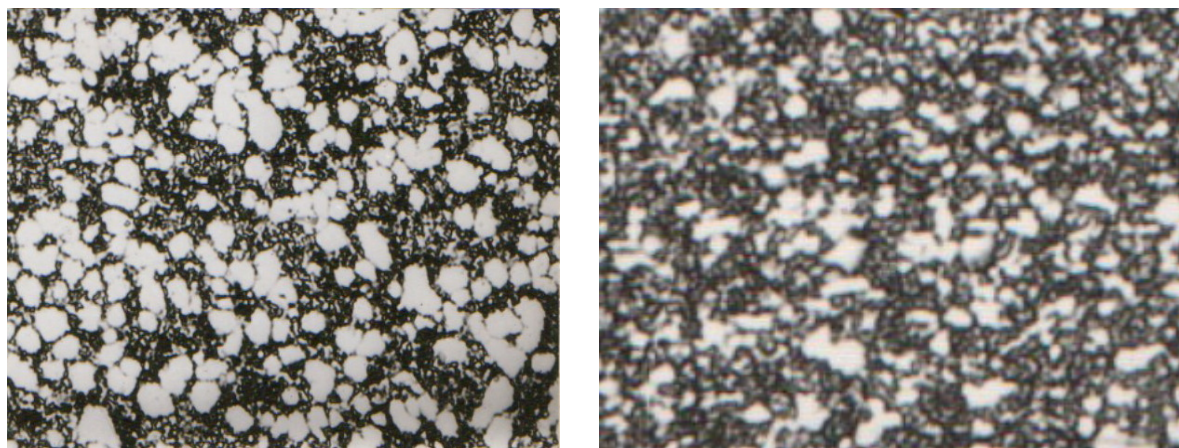
старения это может привести к неравномерному выделению упрочняющих фаз и, как следствие, повышению хрупкости.

Влияние хрома. По мнению Геллера и Брострема, легирование сталей указанного типа хромом нецелесообразно, так как приводит к заметному снижению их критических точек и теплостойкости. Однако известно, что в углеродистых доэвтектоидных сталях хром повышает, а не понижает, как в сплавах с низким его содержанием ($\leq 0,1\%$), температуру начала полиморфного превращения. В свою очередь, повышенное содержание углерода должно оказать благоприятное влияние на дислокационное строение рассматриваемой группы материалов после закалки и, как следствие, на их сопротивление хрупкому разрушению в состоянии поставки. На перспективность данного направления исследований указывало и производство в Японии высокотеплостойкой быстрорежущей стали НКSI состава 3B20K20X4Ф.

Как уже было упомянуто, влияние содержания хрома в пределах $2,5 \dots 7,5\%$ изучали на сталях с основой типа В9М7К8Ф2 с применением методики математического планирования эксперимента. Легирование стали хромом благоприятно отразилось на характере распределения избыточных фаз и повысило ее вязкость. В то же время установлено, что в изученных пределах хром очень слабо влияет на свойства сталей, несколько повышая твердость после старения при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и теплоустойчивость, но незначительно снижает максимально достижимый уровень твердости. В связи с изложенным оптимальным принято содержание в стали $2,0 \dots 2,5\%$ данного элемента.

Влияние титана. Первоначально легирование сталей титаном обуславливалось тем обстоятельством, что при их закалке, в отличие от классических быстрорежущих сталей с карбидным упрочнением, происходит полное растворение избыточной фазы. Данный элемент должен был предотвратить образование крупнозернистой структуры. Однако уже при изучении модельных составов типа 1В9Т и 1М6Т, а также их модификаций с 8% кобальта и 3% кремния, оказалось, что данный элемент принимает активное участие в насыщении твердого раствора при закалке и последующем формировании упрочняющих фаз в процессе отпуска. В связи с этим изучали влияние содержания титана на структуру и свойства сталей рассматриваемого типа. Изменение количества этого элемента в стали типа В10М7К8С3 в пределах $1,5 \dots 3,65\%$ положительно сказывается на всех изученных характеристиках – максимально достижимая твердость, твердость после старения при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и теплостойкость. При этом указанные вариации состава не сказываются на структуре стали, наблюдаемой металлографически.

Однако при дальнейшем одновременном повышении количества кобальта, вводимого в сталь, до $14 \dots 17\%$, а также увеличении суммарного содержания вольфрама и молибдена до 20% картина существенно изменяется. Так, стали с относительно малым ($\approx 14\%$) количеством кобальта и одновременно большим ($\approx 3\%$) титана имеют повышенную склонность к коалиценции избыточных частиц при температуре закалки выше $1270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1).



а) 14 % кобальта, 1 % титана; б) 14 % кобальта, 3 % титана

Рисунок 1 – Влияние соотношения содержания кобальта и титана на склонность стали к коалиценции избыточных фаз, $\times 500$

Вероятно, это обусловлено изменениями в растворимости вольфрама и мо-либдена в твердом растворе и увеличением коэффициента их диффузии в основе при таком соотношении компонентов. Данный факт также логически увязывается с наблюдаемым ранее на модельных сплавах типа 1В9Т и 1В6Т уменьшением на треть содержания в твердом растворе титана при их дополнительном легировании 8 % кобальта.

В рассматриваемой группе сталей титан оказывает слабое отрицательное влияние на твердостные характеристики. Присутствие в составе более 0,7 % титана вызывает также ослабление границ зерен за счет выделения карбонитридов и сульфидов титана. Кроме того, стали с высоким содержанием титана оказываются сильно загрязненными избыточными включениями. Исходя из вышеизложенного, оптимальная концентрация титана в стали составляет 0,15...0,50 %.

Влияние кремния. Данный элемент, с одной стороны, повышает температурный интервал α - γ превращения, а, с другой, наряду с кобальтом, интенсифицирует процесс дисперсионного твердения за счет воздействия на межфазное перераспределение вольфрама и молибдена при термической обработке [3]. Добавка 3 % данного элемента в стали типа 1В9ТК8 и 1М6ТК8 позволяет существенно увеличить при старении выделение из твердого раствора вольфрама, кобальта и титана. В сталях типа 2В20К17Х3ТЮ и 2В15М5К17ТЮ увеличение количества кремния от 0,3 до 2,0 % повышает твердость после закалки на 1 HRC и на 1 балл уменьшает размер аустенитного зерна.

Таблица 1 – Влияние содержания кремния на количество избыточной фазы, %

Тип стали	После закалки		После отпуска	
	0,3 % Si	2,0 % Si	0,3 % Si	2,0 % Si
2В20К17Х3ТЮ	13,02	16,60	16,68	17,56
2В15М5К17Х3ТЮ	15,45	19,53	20,15	23,92

В то же время, эффект положительного влияния кремния на твердость после старения и интенсификацию дисперсионного твердения, наблюдавшийся на модельных составах, в более легированных сталях не проявляется. Наличие повышенного содержания кремния (≈ 2 %) в высоколегированных сталях приводит к неблагоприятным структурным изменениям: увеличению размеров избыточной фазы в исходном состоянии и ухудшению ее растворимости при закалке. В исследованных сталях обнаружено также заметное

обогащение фазы Лавеса кремнием. Более подробно результаты изучения влияния кремния на стали рассматриваемого типа были нами представлены ранее [4].

Согласно данным работы [5], кремний увеличивает динамические колебания решетки при температуре 600 °С, ускоряя процессы разупрочнения. Поэтому положительный эффект от введения большого количества данного элемента, который наблюдали в холодноштамповых вторичнотвердеющих сталях типа 11Х4В2МФ3С2 и 8Х4В2МФС2, не может быть получен на быстрорежущих и горячештамповых сталях, испытывающих существенные температурно-силовые нагрузки.

Окончательно рекомендовано содержание кремния в разрабатываемой стали в пределах 0,2...1,5 %.

Влияние соотношения между содержанием вольфрама и молибдена. Исследовали стали типа 2Х3К17ФТ с 20 % W, 15 % W + 5 % Mo и 9 % W + 11 % Mo в двух вариантах – с 0,3 и 2 % кремния. Переход от легирования стали только вольфрамом к смешанному вольфрам-молибденовому сопровождается снижением твердости после закалки на 1...2 HRC и незначительным ростом аустенитного зерна. По мере снижения концентрации вольфрама уменьшается количество ε -фазы при закалке и несколько увеличиваются ее размеры. Все стали характеризуются наличием в структуре частиц размером менее 1...2 мкм. При повышении содержания вольфрама появляются отдельные включения размером до 6...8 мкм в сталях с низким содержанием кремния и до 1...12 мкм – при его высоком содержании.

Процессы дисперсионного твердения в сталях с высоким содержанием вольфрама протекают значительно медленней, чем в сталях с молибденом, и требуют более высоких температур. Это связано с меньшей диффузионной подвижностью вольфрама. При этом максимальный уровень твердости в сталях с молибденом на 2...3 HRC выше, чем в аналогичных, содержащих только вольфрам.

Влияние углерода. Изучали сталь типа В11М7К17 с 0,1, 0,2 и 0,3 % углерода в сравнении со сталью В11М7К23. Все стали характеризуются довольно равномерным распределением избыточной фазы, но различной дисперсности. Наиболее мелкие частицы наблюдали в стали В11М7К23, самые крупные – в стали В11М7К17 с 0,1 % углерода. Стали, содержащие 0,2 и 0,3 % этого элемента, занимали промежуточное положение. По мере увеличения температуры закалки зерно в сплавах с высоким содержанием углерода росло медленнее, чем в стали В11М7К23. Таким образом, установлено положительное влияние углерода на структурное состояние изученных сталей.

Заключение. По результатам проведенных исследований была разработана сталь 3В9М10К16, содержащая 0,10...0,35 % углерода, 8...15 % вольфрама, 7...12 % молибдена, 15...17,8 % кобальта, 0,5...3,5 % хрома, 0,1...0,5 % ванадия, 0,2...1,5 % кремния, 0,4...1,0 % титана, 0,3...1,0 % марганца, остальное железо, предназначенная для изготовления тяжелонагруженного режущего инструмента. Свойства новой стали по сравнению с В11М7К23: прочность при изгибе 2600...2800 МПа против 1700...2200 МПа для прототипа, твердость в состоянии эксплуатации – 67...68 HRC для обеих марок, ударная вязкость в состоянии эксплуатации 0,11...0,14 и 0,10 МДж/м² соответственно, технологическая пластичность (число скручиваний при температуре 1250 °С) 25 и 6 соответственно.

Лабораторные и производственные (в условиях Московского машиностроительного завода «Опыт») испытания инструмента из новой стали показали повышение в 3...5 раз стойкости фрез и сверл при росте производительности обработки на 10...30 % по сравнению с показателями, характерными для стали Р6М5К5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.

2. Геллер Ю. А. Легирование быстрорежущих сплавов с интерметаллидным упрочнением / Ю. А. Геллер, В. А. Брострем // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1970. – № 1. – С. 9-12.
3. Скрынченко Ю. М. О влиянии кобальта и кремния на процессы старения сплавов Fe-W-Ti и Fe-Mo-Ti / Ю. М. Скрынченко, А. В. Ковальчук, В. Д. Жалыбина // *Инструментальные и подшипниковые стали*. – М.: *Металлургия*, 1980. – № 5. – С. 11-18.
4. Влияние кремния на состав и дисперсность избыточных фаз в сплавах Fe-Co-W-Mo с интерметаллидным упрочнением / В. Н. Терехов, В. И. Канюка, Н. А. Рябухина, А. Н. Мороз // *Металургія: наукові праці ЗДІА*. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 23. – С. 104-108.
5. Оржицкая Л. К. Исследование влияния легирующих элементов на теплофизические характеристики бинарных сплавов на основе α -железа / Л. К. Оржицкая, Ю. М. Скрынченко, А. П. Колесник // *Новое в разработке, производстве и применении инструментальных материалов: материалы 9-го межд. семинара (4-6 сент. 2002 г., Запорожье): тезисы докл.* – Киев: ИПМ им. И.Н. Францевича НАНУ, 2002. – С. 27-28.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2011 р.

Рецензент, проф. Ю.Ф. Терновий