

НОВЫЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ НА ПРЕССОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Рассмотрены металлургические и технологические особенности наплавки на сталь термостойких сплавов с композиционной структурой, работающих при циклическом температурно-силовом воздействии в диапазоне температур 700–1100°С.

Введение

Ресурс работающих в условиях циклического температурно-силового воздействия без ударов наплавленных прошивных пуансонов, прессовых штампов для производства подшипников, матриц для горячего прессования труб и других тяжело нагруженных инструментов, деформирующихся нагретые до 700–1200°С стальные заготовки, определяется преимущественно износостойкостью тонких приконтактных слоев наплавленного металла [1]. При наплавке на такой инструмент промышленных теплостойких хромовольфраммолибденовых сталей [2], имеющих структуру легированного мартенсита с карбидами, под действием циклического температурно-силового воздействия в поверхностном слое наплавленного металла образуется диффузионная зона, в которой происходит распад мартенсита и быстро коагулируют карбиды, что ускоряет износ. Более износостойкими в таких условиях являются высокохромистые чугуны [3] и другие сплавы, имеющие композиционную структуру с направленной кристаллизацией эвтектических фаз.

Пониженная скорость разупрочнения подобных материалов при циклическом температурно-силовом воздействии обусловлена высокой энергией активации диффузии атомов основного и легирующих элементов вследствие их гетерофазной структуры, состоящей из пластичного α - или γ -твердого раствора, прочного каркаса карбидной эвтектики и мелкодисперсных упрочняющих фаз: труднорастворимых при рабочих температурах интерметаллидов, монокарбидов, сложных высоколегированных карбидов и нитридов.

Большинство современных износостойких теплостойких и жаропрочных наплавленных сплавов на железной, никелевой и кобальтовой основах имеют композиционную структуру, что схематично показано на рис. 1. Но по ряду причин при наплавке на прессовый инструмент многих высоколегированных и жаропрочных композиционных материалов не обеспечивается требуемый уровень сварочно-технологических свойств, под которым прежде всего подразумевается качество формирования наплавленного металла, его стойкость к образованию горячих и холодных трещин, жаростойкость, износостойкость, сопротивление деформации и термической усталости при рабочих температурах. Для получения комплекса всех этих свойств на требуемом уровне должно быть обеспечено рациональное атомное соотношение легирующих карбидообразователей и углерода при содержании хрома не менее 20 масс. %. В этом

*Волгоградский государственный технический университет (основная часть исследований выполнена в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины под руководством д. т. н., профессора И. И. Фрумина).

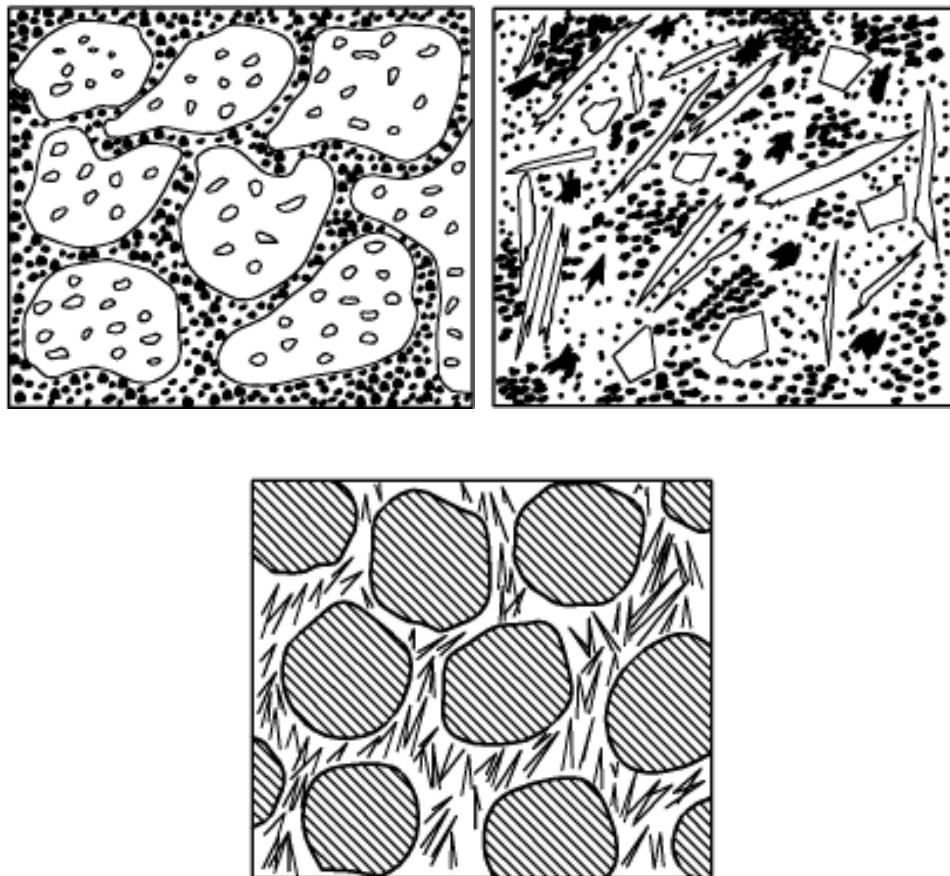


Рис. 1. Схемы типичных структур композиционных износостойких сплавов:
a – каркас карбидной эвтектики вокруг зерен твердого раствора, содержащего упрочняющие фазы; *б* – равномерно распределенная по структуре карбидная эвтектика, различные типы карбидов и интерметаллидов в твердом растворе; *в* – зерна литых карбидов и боридов в пластичном твердом растворе

смысле для сплавов на железной основе, эффективно работающих при температуре до 700–750°C, перспективна система легирования Fe–Cr–Mo–C [4], а в диапазоне рабочих температур до 850–900°C предпочтительнее сплавы системы Ni–Cr–Mo–Nb–C [5].

Материалы и методы исследования

Исследовали влияние соотношения легирующих элементов в сплавах указанных систем легирования на структуру, фазовый состав, высокотемпературную твердость, скорость окисления и склонность к образованию горячих трещин при электрошлаковой и аргонодуговой наплавке порошковыми проволоками.

Высокотемпературную твердость наплавленных экспериментальных образцов измеряли на приборе ТШ-2 твердосплавным шариком из бериллия диаметром 5 мм при нагрузке 7,35 кН и выдержке 10 с. Скорость окисления сплавов каждой системы легирования оценивали по изменению массы образцов после выдержки их в течение 2 ч в электропечи с температурой 700 и 900°C соответственно. Склонность к образованию горячих трещин оценивали по количеству их в металле пятислойного валика, наплавленного аргонодуговым способом и под флюсом АН-20 на длинный торец образца размером

10×100×300 мм из стали 20. Износостойкость и термическую усталость определяли по результатам натуральных испытаний наплавленного штампового инструмента для производства подшипников. Исследования структуры сплавов и переходных с металлом подложки зон проводили на микроскопах МИМ-8М и OLIMPUS-BX61, электронно-микроскопические исследования – на приборе УЭН-100 с графитовых реплик. Качественный и количественный составы наплавленного металла определяли рентгеноструктурным анализом в кобальтовом и медном излучениях на приборе ДРОН-3 с микрошлифов. Микрорентгеноспектральный анализ выполняли на приборе Самеса-MS46 при диаметре зонда 1 мкм. Механические свойства исследуемых сплавов определяли на машине ИМАШ-5С65.

В качестве шихтовых материалов для изготовления порошковых проволок использовали технически чистые порошки металлов и минералов, а также тонкие проволоки из вольфрама, молибдена и нихрома. Трубчатую оболочку проволоки изготавливали из стальной ленты Св-08А и никелевой ленты Нп-2.

Эксперимент

Эксперименты по электрошлаковой наплавке на подложку из стали 40Х выполняли традиционным способом в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе порошковыми проволоками диаметром 3,5 мм на постоянном токе прямой полярности с применением флюса АНФ-6. Цилиндрические образцы из наплавленного металла диаметром 30 мм, длиной 60 мм вырезали в направлении, перпендикулярном кристаллитам.

Экспериментальные сплавы на железной основе были легированы 17–31 масс. %Cr; 2–16 масс. %Mo; 0,6–2,8 масс. %C; 0,5–3,5 масс. %Ni, содержание примесей в них составляло 0,2–0,6 масс. %Mn; 0,35–0,65 масс. %Si; 0,012–0,015 масс. %S; 0,004–0,005 масс. %P. Экспериментальные сплавы на никелевой основе были легированы 1,58–2,84 масс. %C; 19,6–24,5 масс. %Cr; 2,85–9,5 масс. %Mo; 0,65–2,86 масс. %Nb. Содержание других элементов находилось в пределах 0,6–0,85 масс. %Si; 0,4–0,6 масс. %Mn; 3–5 масс. %Fe; 0,012–0,015 масс. %S; 0,004–0,005 масс. %P. Количество углерода в наплавленном металле определяли исходя из возможности обеспечения атомных соотношений молибдена, ниобия и углерода не менее критических, при которых образуются сложные и специальные карбиды хрома, молибдена и ниобия. Пределы легирования хромом определяли из расчета получения максимальной жаростойкости наплавленного металла. Эксперименты показали, что при увеличении содержания хрома до 30% и более жаростойкость сплавов исследуемых систем легирования существенно не повышается. Повышается лишь твердость при нормальной температуре, что ухудшает обрабатываемость металла после наплавки.

Результаты и их обсуждение

Исследованиями показано (рис. 2), что в сплавах системы Fe–Cr–Mo–C при соотношении атомного содержания элементов Cr/C и Mo/C в пределах 2,5–3 и 0,3–0,5 соответственно достигается высокий уровень сварочно-технологических свойств композиционного наплавленного металла, достаточный для эффективной работы пресового инструмента в рассматриваемых условиях [6]. Структура композиционного сплава с таким соотношением легирующих элементов состоит из легированного молибденом α -твердого раствора с субдисперсными частицами интерметаллической ξ -фазы, сходной по кинетике образования с σ -фазой и имеющей состав $Fe_{12}Cr_{36}Mo_{10}$, и карбидной эвтектики, состоящей из равномерно распределенных в междендритных участках карби-

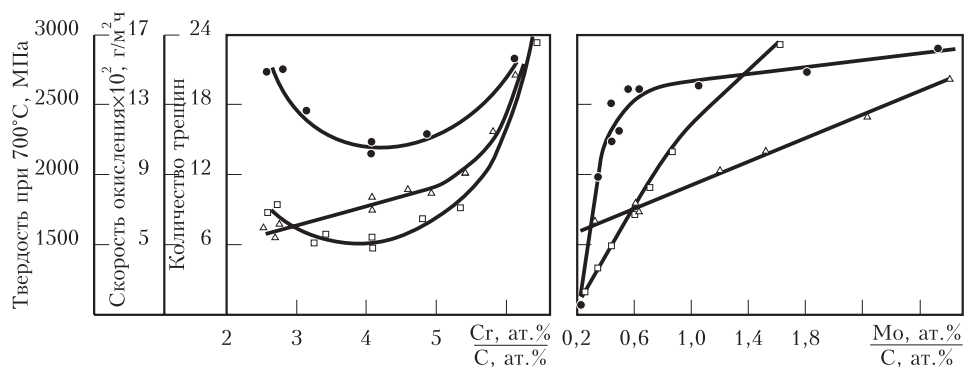


Рис.2. Влияние соотношений Cr/C и Mo/C на свойства наплавленного металла системы Fe–Cr–Mo–C при содержании 0,6–2,8 масс. %C; 17–31 масс. %Cr; 2–16 масс. %Mo; 0,012–0,015 масс. %S; 0,2–0,6 масс. %Mn; Fe – остальное:
 □ – высокотемпературная твердость; ● – скорость окисления; △ – склонность к образованию горячих трещин

дов типа $(Mo, Cr, Fe)_{23}C_6$ и $Fe_3(MoC)$ (рис. 3).

При увеличении соотношения атомного содержания элементов $Cr/C > 0,3$ чрезмерно увеличивается объемное содержание твердого раствора в структуре (до 85–90 об.%), что приводит к снижению требуемого уровня высокотемпературной твердости, хотя жаростойкость и трещиностойкость металла остаются высокими. Увеличение соотношения атомного содержания элементов $Mo/C > 1$ обуславливает в структуре большое (70–80%) объемное содержание эвтектических карбидов с повышенной концентрацией молибдена. Наплавленный металл с такой структурой не термостойкий – он обладает низкой стойкостью к образованию горячих трещин и интенсивно окисляется при рабочих температурах из-за образования окислов молибдена низкой плотности.

При введении в композиционный наплавленный металл 1,0–2,5 масс. %Ni повышаются пластичность сплава и стойкость его к образованию горячих трещин, так как изменяются количество и распределение эвтектических карбидов и увеличивается содержание твердого раствора в структуре (рис. 4). Такой эффект обусловлен способностью никеля влиять на термодинамическую активность углерода в сплавах рассматриваемой системы легирования. Массовое содержание никеля более 3% нежелательно, так как это приводит к снижению высокотемпературной твердости и износостойкости материала.

При верхних пределах легирования молибденом и ниобием в наплавленном металле системы Ni–Cr–Mo–Nb–C образуется большое (до 60 об. %) количество карбидов и интерметаллидов, что сильно снижает пластичность и термическую усталость композиционных сплавов и стойкость их к трещинообразованию при наплавке. При уменьшении содержания молибдена и ниобия до нижнего предела значительно снижается высокотемпературная твердость металла.

При соотношении атомного содержания элементов Mo/C в пределах 0,18–0,25 (рис. 5) композиционный сплав имеет повышенные сварочно-технологические свойства при работе в условиях циклического силового воздействия при температурах до 900°C. Структура такого сплава характеризуется равномерным распределением двух видов карбидной эвтектики, легированного твердого раствора на основе никеля и карбидов NbC и MoC (рис. 6, а). При массовом содержании ниобия 1,8–2,5% обеспечивается хорошая стойкость наплавленного металла к образованию горячих трещин при максимальной высокотемпературной твердости (рис. 7, а). Такое влияние ниобия обусловлено

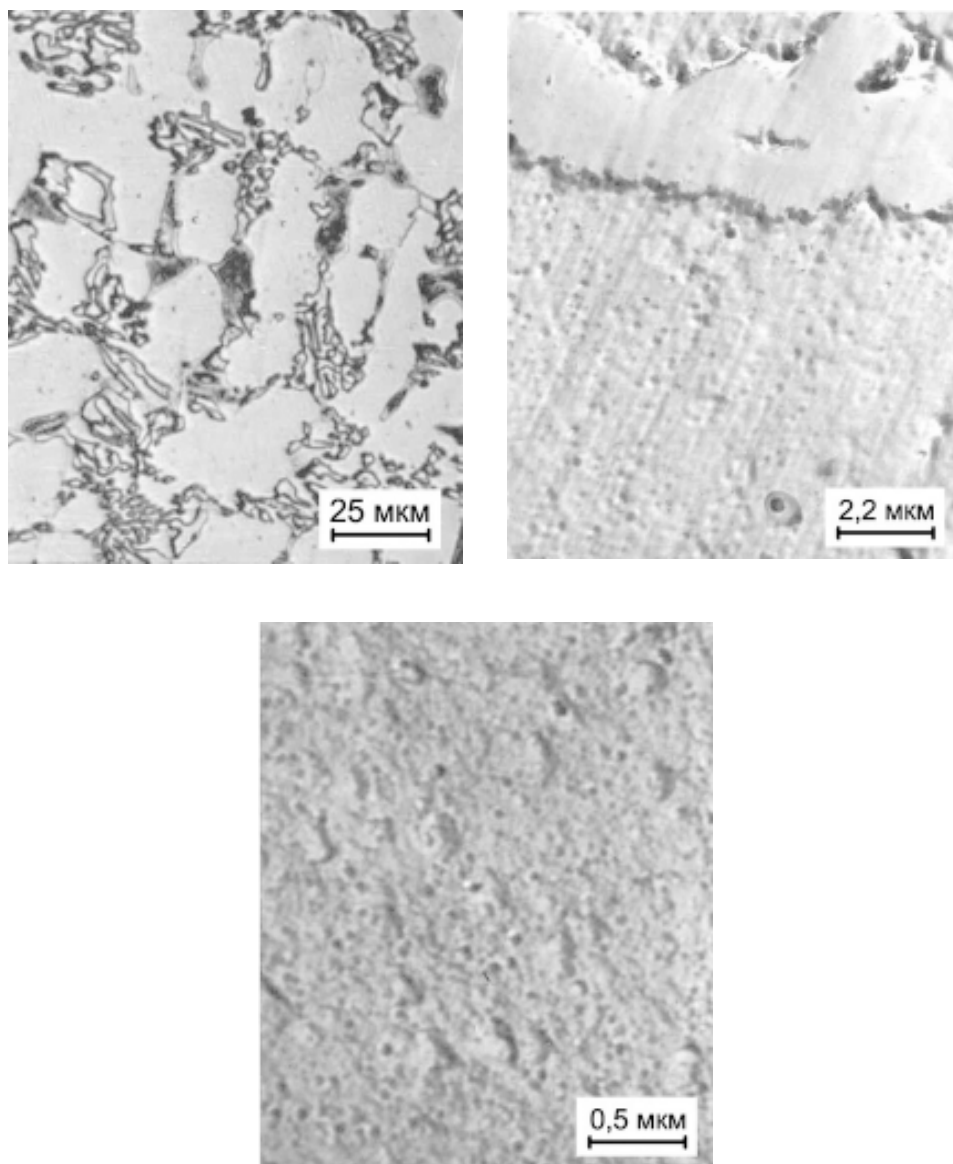


Рис. 3. Структура наплавленного металла:

a – общий вид структуры. $\times 400$; *b* – γ -твердый раствор с карбидом. $\times 4500$; *в* – σ -фаза в твердом растворе. $\times 20\ 000$

его сильной ликвацией, вызванной карбидообразованием (рис. 7, б), что приводит к измельчению дендритов, дроблению карбидной эвтектики и относительно равномерному распределению кремния в эвтектике и зернах металла. Молибден также распределен равномерно, что объясняется его сильной химической связью с никелем, и это является одной из причин повышенной жаропрочности никелевых сплавов, содержащих молибден, по сравнению со сплавами, содержащими вольфрам.

При соотношении атомного содержания элементов $Mo/C > 0,25$ в металле образуются карбиды Mo_2C , термодинамически менее устойчивые, чем MoC . Высокотемпературная твердость и жаростойкость композиционного напла-

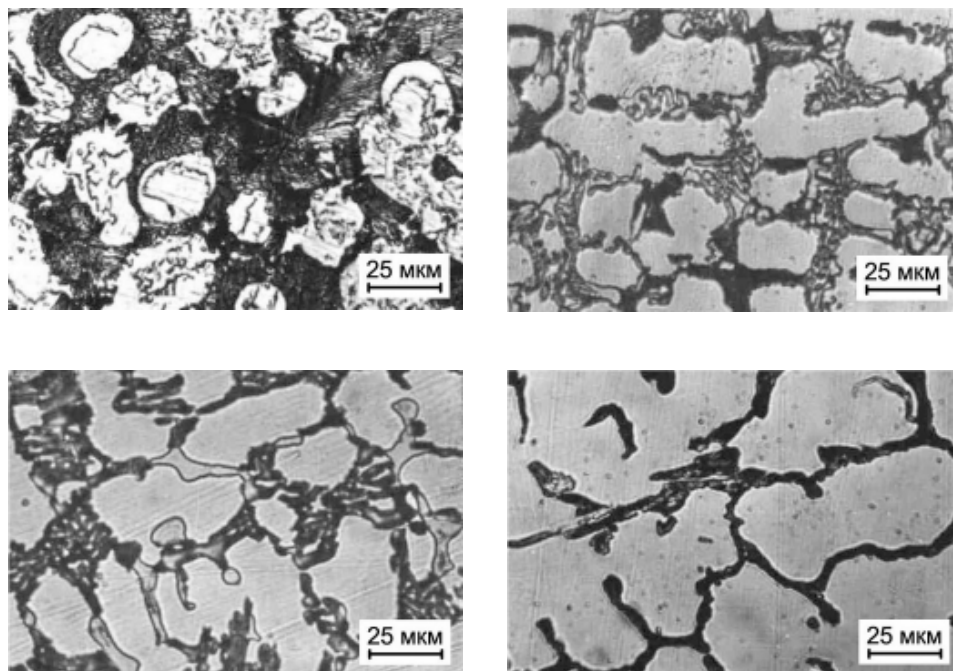


Рис. 4. Влияние содержания никеля на структуру наплавленного металла, содержащего 25 масс. %Cr; 7,5 масс. %Mo; 2,1 масс. %C; Fe – остальное. $\times 400$:
a – без никеля; *b* – 0,9 масс. %Ni; *v* – 2,1 масс. %Ni; *z* – 3,2 масс. %Ni

ленного металла в этом случае снижается, а склонность к образованию горячих трещин повышается. Падение жаростойкости можно объяснить увеличением содержания молибдена в твердом растворе и образованием на поверхности металла легковозгоняемого оксида молибдена. Трещинообразование увеличивается вследствие роста объемного содержания эвтектических карбидов.

В модельных условиях циклического температурно-силового воздействия (изменение температуры от 150 до 900°C; усилие 300 МПа; время контакта с нагретой до 950°C сталью 40X – 2 с; количество циклов испытания – 500) ис-

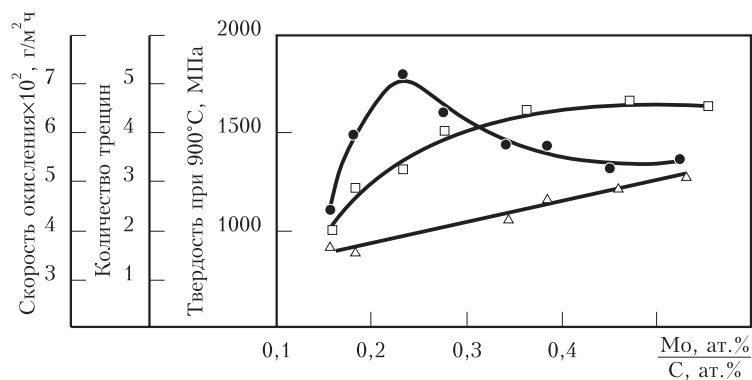


Рис. 5. Влияние соотношения Mo/C на свойства наплавленного металла системы Ni–Cr–Mo–Nb–C при соотношении Cr/C = 2,4–2,6:
 □ – склонность к образованию горячих трещин; ● – высокотемпературная твердость;
 ▲ – скорость окисления

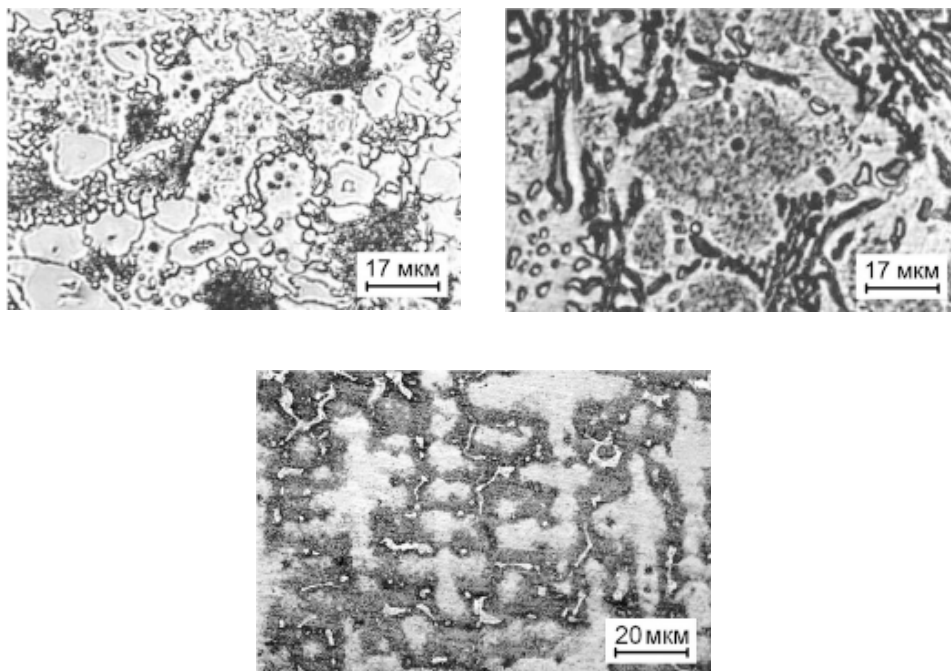


Рис. 6. Микроструктура композиционных сплавов на основе никеля:
 а - сплав 220Х21Н70М4Б1. $\times 600$; б - сплав 220Х20Н68В4М3Ц4Б2. $\times 600$; а - сплав на основе Ni₃Al. $\times 500$

пытавали образцы из металла с массовым содержанием 2,55%С; 4,5%Мо; 22,5%Cr; 2,1%Nb. После испытаний заметного изменения структуры и свойств наплавленного металла обнаружено не было. Незначительно (на 50–60 HV) по сравнению с исходной (400–420 HV) увеличилась твердость за счет распада γ -твердого раствора и образования вторичных карбидов.

Разработанные составы порошковых проволок [6, 7], обеспечивающие при электрошлаковой и электродуговой сварке наплавленный металл композиционного типа 200Х23М6Н2 и 250Х22Н66М4Б2, прошли промышленные испытания при наплавке на прессовый инструмент – штампы для производства подшипников, носки оправок трубопрокатного агрегата, кромки ножей для резки горячего проката. Инструмент с наплавкой таких сплавов по сравнению с промышленными сплавами системы Fe–Cr–W–Mo–C обладает в 2–2,5 раза большей износостойкостью.

При повышении рабочих температур в процессе циклического температурно-силового воздействия до 1100–1200°C, что характерно для условий работы инструмента при производстве горячекатаных и прессованных труб, даже кобальтовые стеллиты и никелевые суперсплавы типа хастеллой-С являются недостаточно стойкими. Повысить эксплуатационные свойства наплавленного металла при температурах выше 1000°C можно легированием никелевой матрицы хромом, углеродом и тяжелыми тугоплавкими металлами до предела их растворимости. При электрошлаковой наплавке с применением порошковой проволоки [8] композиционный металл системы Ni–Cr–Mo–W–Ta–Nb–C характеризуется высокой гетерогенностью направленно кристаллизованной структуры (рис. 6, б), что позволяет получить наряду с хорошими сварочно-технологическими свойствами повышенную (по сравнению с другими наплавочными материалами) твердость наплавленного металла (рис. 8, 4) и высо-

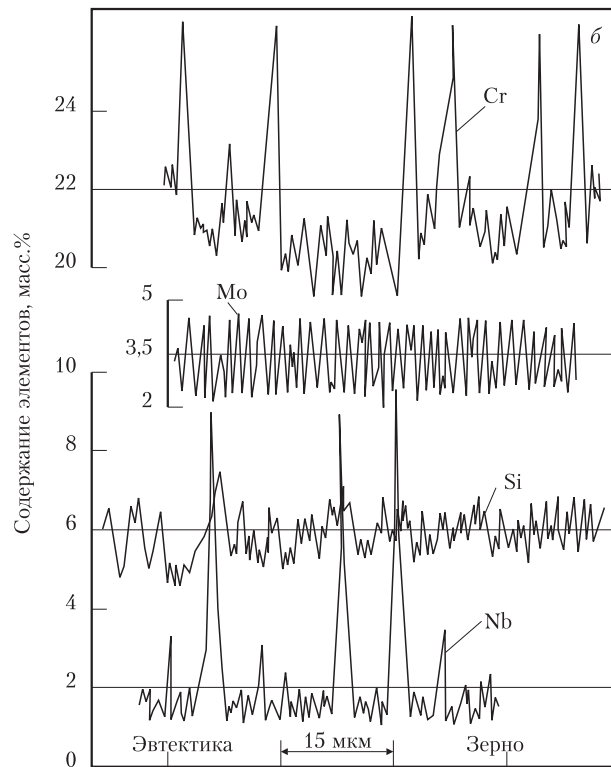
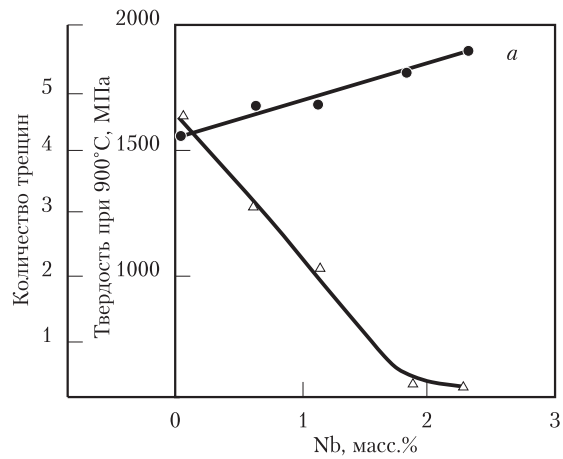


Рис. 7. Влияние содержания ниобия на склонность к образованию горячих трещин (а) и высокотемпературную твердость (б), а также на распределение легирующих элементов в наплавленном металле системы Ni–Cr–Mo–Nb–C

кую стойкость к образованию трещин термической усталости. Но из-за особенностей технологии производства и высокой себестоимости порошковой проволоки применение ее в промышленности пока проблематично.

Более экономичны для наплавки на металлургический инструмент жаропрочные литейные сплавы на основе алюминида γ -Ni₃Al [9]. Но вследствие неравномерного выделения γ -фазы в условиях жесткого термомеханического цикла сварки они обладают невысокой стойкостью к образованию горячих трещин при наплавке, поэтому в качестве наплавочных материалов не приме-

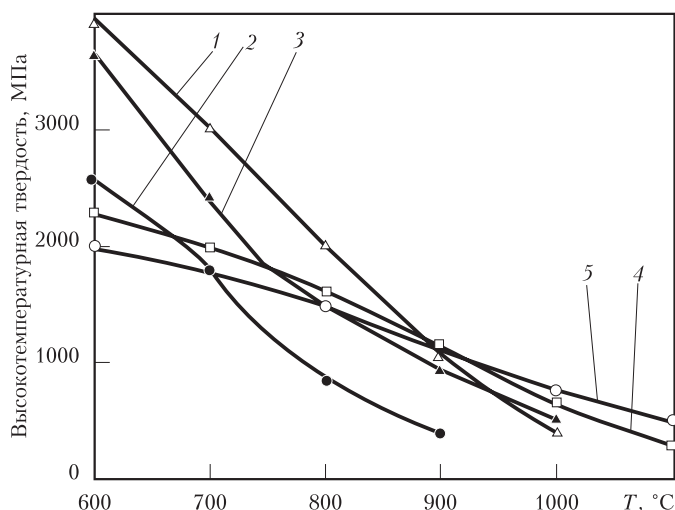


Рис. 8. Высокотемпературная твердость наплавленного металла:
 1 – промышленный сплав 35ХЗВ9СФ; 2 – сплав 260Х28М6Н2; 3 – сплав 220Х21Н70М4Б1; 4 – сплав 200Х20Н68В4М3Ц4Б2; 5 – сплав на основе Ni₃Al

няются.

Разработанные составы порошковой проволоки, содержащей никель и алюминий в стехиометрическом соотношении, и технология ее электрошлаковой наплавки [10] обеспечивают получение качественного высокостойкого жаропрочного наплавленного металла на основе Ni₃Al. Структура композиционного сплава системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Zr-C состоит из легированного алюминиды γ-Ni₃Al (до 70 об. %). В междендритных участках структуры имеются выделения κ-фазы CrNiMoZr (15–20 об. %) и образуется пластичная γ-фаза (5–7 об. %) – неупорядоченный твердый раствор алюминия в никеле. Наблюдаются также отдельные выделения γ-Ni₃Al и карбидов WC, Mo₂C, Ta₂C и Cr₇C₃ (рис. 6, в). Несмотря на дендритное строение такой композиционный сплав обладает достаточной стойкостью к образованию горячих трещин и трещин термической усталости. Вероятной причиной хорошей трещиностойкости наплавленного металла является равномерное распределение по его объему вязкого γ-твердого раствора, релаксирующего термические напряжения. Данные о высокотемпературной твердости нового композиционного материала представлены на рис. 8, 5. Лабораторные и натурные испытания прошивного инструмента с наплавкой из сплавов на основе Ni₃Al, предназначенного для деформации нагретых до 1200°C заготовок из стали ШХ15, показали, что стойкость к образованию трещин нового композиционного сплава в 1,3–1,5 раза выше стойкости наплавки из сплава хастеллой-С.

ВЫВОДЫ

1. Высокостойкую в условиях циклического температурно-силового воздействия композиционную структуру наплавленного металла можно получить при легировании высокоуглеродистых хромистых сплавов сильными карбидообразующими элементами и модификаторами.

2. При рабочей температуре 700–750°C эффективна система легирования Fe-Cr-Mo-C при соотношении в сплавах атомного содержания элементов Cr/C и Mo/C в пределах 2,5–3,0 и 0,3–0,5 соответственно и предельном массовом

содержании хрома до 30% и никеля до 2%.

3. При повышении рабочих температур до 900°C предпочтительны никелевые сплавы системы Ni-Cr-Mo-C-Nb при соотношении атомного содержания элементов Mo/C в пределах 0,18-0,25 и массовом содержании ниобия до 2 %.

4. При электрошлаковой наплавке композиционного металла на основе алюминида Ni_3Al в системе легирования Ni-Al-Cr-W-Mo-Ta-Zr-C должно быть обеспечено стехиометрическое атомное соотношение никеля и алюминия, а соотношение активных карбидообразователей и углерода в нем необходимо устанавливать из условия получения монокарбидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордань Г. Н., Соколов Г. Н., Кащенко Ф. Д. Характер разупрочнения наплавленного металла при импульсном термосиловом воздействии Автоматическая сварка. – 1988. – № 10. – С. 59–62.
2. Фрумин И. И. Современные типы наплавленного металла и их классификация Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл Под ред. И. И. Фрумина. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. – С. 3–11.
3. Кусков Ю. М., Фрумин И. И., Ксендзык Г. В. Износостойкость и термическая выносливость наплавленного хромистого чугуна Автоматическая сварка. – 1978. – № 6. – С. 64–67.
4. Соколов Г. Н. Влияние соотношения хрома, молибдена и углерода на структуру и свойства наплавленного металла системы Fe-Cr-Mo-C Сварочное производство. – 2000. – № 11. – С. 3–5.
5. Соколов Г. Н. Свойства наплавленного металла системы Fe-Cr-Mo-C для наплавки инструмента для деформирования сталей Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 53–54.
6. А. С. № 1120580 РФ, МКИ³ В23К 35/36.
7. А. С. № 1123217 РФ, МКИ³ В23К 35/36.
8. А. С. № 1389147 РФ, МКИ³ В23К 35/36.
9. Качков Г. Н. Перспективные жаростойкие и жаропрочные сплавы на основе интерметаллидов NiAl и Ni_3Al Сталь. – 2002. – № 2. – С. 74–77.
10. Электрошлаковая наплавка термостойкого сплава на основе Ni_3Al на сталь с целью упрочнения инструмента для горячего деформирования сталей Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, С. Н. Цурхин и др. Вопросы материаловедения. – 2004. – № 2. – С. 1–12.

Статья поступила 16.11.2004.