

3. Вышеуказанные условия сварки обеспечивают отсутствие в ЗТВ сварного шва предпосылок для образования «горячих» и «холодных» трещин.

#### Список литературы

1. Макаров Г.И. Нормативные требования к вязкости разрушения трубных сталей // Сварочное производство. 2010. №5. С. 36-39.
2. Шоршоров М.Х., Чернышова Т.А., Красовский А.И. Испытания металлов на свариваемость. М.: Металлургия, 1972. 240 с.
3. Емелюшин А.Н., Шекшеев М.А. Исследование влияния термических циклов на структуру основного металла при сварке стали категории прочности K56 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 69-й научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Т.1. С. 150-153.
4. Хакимов А.Н. Электродшлаковая сварка с регулированием термического цикла. М.: Машиностроение, 1984. 208 с.
5. Сварка. Резка. Контроль: справочник. В 2 т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. Т.1. 624 с.: ил.
6. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // Сварочное производство. 2010. №5. С. 5-11.
7. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. К.: Наук. думка, 1978. 276 с.
8. Тодоров Р.П., Христов Хр.Г. О видманштеттовых структурах углеродистых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. №2. С. 3-7.

#### Bibliographic

1. Makarov G.I. Regulatory requirements for fracture toughness of pipe steels // Welding production. 2010. №5. P. 36-39.
2. Shorshorov M.H., Chernyshova T.A., Krasovsky A.I. Metal testing on weldability. M.: Metallurgy, 1972. 240 p.
3. Emeljushin A.N., Shecsheev M.A. Investigation of the influence of thermal cycles on the structure of the base metal in welding of steel category K56 / Actual problems of modern science, technology and education: materials of the 69-th scientific-technical conference. Magnitogorsk: publ. Magnitogorsk. State Technical University. G.I. Nosova, 2011. Vol.1. 268 p.
4. Hakimov A.N. Electroslag welding with the regulation of the thermal cycle. M.: Mechanical engineering, 1984. 208 p.
5. Welding. Cutting. Control: A Handbook. In 2 volumes / Under the agg. Ed. N.P. Aleshin, G.G. Chernyshov. M.: Machinery, 2004. Vol.1. etc. 624 p.
6. Efimenko L.A., Elagina O.U., Vishemirskiy E.M. Features of the approach to the evaluation of weldability of high-strength low-carbon pipe steels // Welding production. 2010. №5. P. 5-11.
7. Grabin V.F., Denisenko A.V. Physical metallurgy of welding of low and medium alloy steels. To the.: Naukova Dumka, 1978. 276 p.
8. Todorov R.P., Christov Xr. G. About vidmanshtet structures of carbon steels // Metal science and thermal treatment of metals. 2004. №2. P. 3-7.

УДК 621.785.797

Нестеренко А.М., Сычков А.Б., Сухомлин В.И.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАНКИ ИЗ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ СТАРЕНИИ

В результате проведенных исследований установлено, что при микролегировании бором факторами уменьшения концентрации твердорастворного азота в результате его связывания бором в борсодержащие соединения, повышения предельной растворимости С в феррите стали и снижения степени блокировки дислокаций атомами С «деактивируется» развитие процессов статического и динамического деформационного старения в углеродистых и низколегированных сталях. Показано, что более высокая технологичность при переделе волочением катанки из микролегированной бором стали Sv-08Г2, предназначенной для изготовления сварочной проволоки, по сравнению с таковой из аналогичной стали без бора обусловлена меньшей степенью развития динамического деформационного старения.

**Ключевые слова:** статическое и динамическое деформационное старение, низкоуглеродистая легированная сталь, микролегирование бором, блокировка дислокаций, азот.

The studies found that when mikrolegirova-Research Institute of factors reduce the concentration of boron oxide solid solution as a result of its binding to the boron-boron-containing compounds enhance the solubility limit C in ferrite steel and reduce the blocking of dislocations with atoms of the «deactivated» the development process of static and dynamic strain aging in the Raman carbon and low alloy steels. It is shown that the more high tech in the redistribution of the drawing rod with boron microalloyed steel Sv-08G2, intended for the manufacture of welding wire, as compared with that of the same steel without boron is due to a lower degree of dynamic strain aging.

**Keywords:** static and dynamic strain aging, alloy low-carbon steel, microalloying with boron, the lock dislocations and nitrogen.

Исследования и разработки, проведенные Институтом чёрной металлургии НАН Украины (г. Днепрпетровск) совместно с Молдавским металлургическим заводом (г. Рыбница), позволили установить, что микролегирование углеродистых, низко- и среднелегированных сталей массового назначения бором повышает их пластичность и деформируемость при холодном волочении [1–4]. Причина «пластифицирующего» влияния введенных в сталь микродобавок бора до настоящего времени не находила объяснения. Поэтому исследования и разработки, выполняемые в этом направлении, представляются актуальными.

Известно [5, 6], что холодное волочение и, в целом, производство катанки на ме-тизном переделе сопряжено с развитием в ней процессов динамического (д.д.с.) и

статического (с.д.с.) деформационного старения. В основе механизмов процесса деформационного старения лежат закономерности взаимодействия атомов углерода (С) и азота (N) с дислокациями, которые введены в металл при деформации [6]. На основании проведенного анализа размерно-геометрических факторов в [7] показано, что при микролегировании сталей бором его атомы занимают в ОЦК-решётке  $\alpha$ -Fe (феррита) позиции замещения. Вызванные этим изменения размерно-геометрических параметров тетраэдрических пор в ОЦК-решётке  $\alpha$ -Fe и взаимодействия между атомами С, N, В и Fe могут существенным образом сказываться на развитии процессов с.д.с. и д.д.с.

Влияние микролегирования бором на развитие с.д.с. исследовалось на образцах катанки из углероди-

стой стали 70. Установлено, что при «остаривающей» обработке, включающей деформацию растяжением с остаточным удлинением 6% и отпуск при температуре 200°C в течение 1 ч, прирост прочностных свойств, обусловленный с.д.с., в катанке из борсодержащей стали намного ниже, чем в стали без бора. Более выраженное различие по приросту прочностных свойств для стали с бором и без бора наблюдается при этом для временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$ :  $\Delta\sigma_b = -52 \text{ Н/мм}^2$ . Прирост по пределу текучести менее выражен:  $\Delta\sigma_T = -11 \text{ Н/мм}^2$ .

Результаты этого эксперимента свидетельствуют о том, что в сталях с бором с.д.с. феррита развивается менее интенсивно, чем в сталях без бора.

С.д.с. при производстве проволоки на метизном переделе осуществляется, в основном, в ходе постдеформационных процессов при волочении или при охлаждении готовой проволоки в шпулях и оказывает существенное влияние на формирование конечного уровня её механических и служебных свойств.

Ещё более важным с точки зрения определения способности катанки из сталей разного марочного состава к деформации волочением и установления тем самым ресурса технологической пластичности является изучение особенностей развития д.д.с. непосредственно в процессе деформации при температурах 100-500°C и имеющих место в процессе этого передела.

Приведенные в [6] данные фундаментальных работ свидетельствуют о том, что температурная зависимость д.д.с. в углеродистых сталях характеризуется двумя температурными интервалами экстремального изменения механических свойств, которые проявляются практически для всех структурных состояний этих сталей (горячекатаное, нормализованное, закаленное, после нормализации с отпуском и закалки с отпуском). Аномальное изменение свойств в интервале температур 150-300°C авторы [6] связывают, как это и общепринято, с синеломкостью стали, вызванной развитием д.д.с. Аномальное изменение механических свойств (повышение прочностных и снижение пластических свойств) в предрекристаллизационном интервале температур 400-500°C общепринятого названия не имеет. По мнению авторов [6], оно обусловлено перераспределением дислокаций и примесных атомов, прежде всего углерода и азота, в феррите сталей и динамической сфероидизацией цементита, приводящей на начальных стадиях к обогащению границ субзерен углеродом.

Применительно к развитию процессов д.д.с. проведено исследование катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08Г2С без бора (плавка 283684) и с микродобавкой (0,005%) бора (плавка 285378) производства ОАО «Молдавский металлургический завод» (ОАО «ММЗ»). Химический состав исследованных плавки стали Св-08Г2С приведен в таблице.

Испытания на растяжение при комнатной температуре (для определения исходного уровня механических свойств исследованных образцов катанки) и при температурах 100-500°C проводили на разрывной машине ЦД 10/90 (шкала 2 т), оснащенной высокотемпературной приставкой. Время выдержки при температуре испытания составляло 15 мин. Скорость

растяжения образцов при проведенных испытаниях образцов на растяжение составила 2 мм/мин.

#### Химический состав исследованных плавки

Номер плавки	Массовая доля элементов, %						
	C	Mn	Si	S	P	B	N
283684	0,07	1,87	0,78	0,003	0,010	–	0,005
285378	0,04	1,79	0,75	0,002	0,010	0,005	0,005

Температурная зависимость изменения механических свойств катанки из исследованных сталей при испытаниях в интервале температур 100-500°C отличалась от вышеприведенных данных работы [6]. Вместо характерного для углеродистых сталей подъема уровня прочностных свойств в указанном интервале температур в катанке из стали Св-08Г2С без и с микродобавкой бора наблюдается устойчивое снижение прочностных свойств с фактической минусовой убылью практически для всех температур испытаний, более выраженное для стали с бором (исключение – плюсовые по сравнению с исходным состоянием значения  $\sigma_b$  для температуры испытания 350°C в катанке из стали Св-08Г2С без бора, рис. 1).

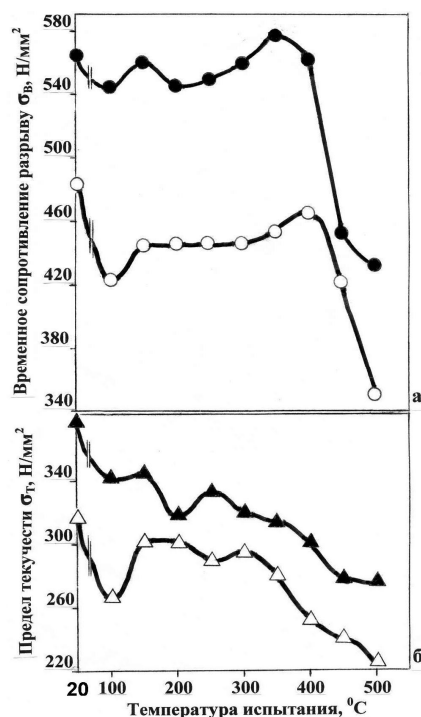
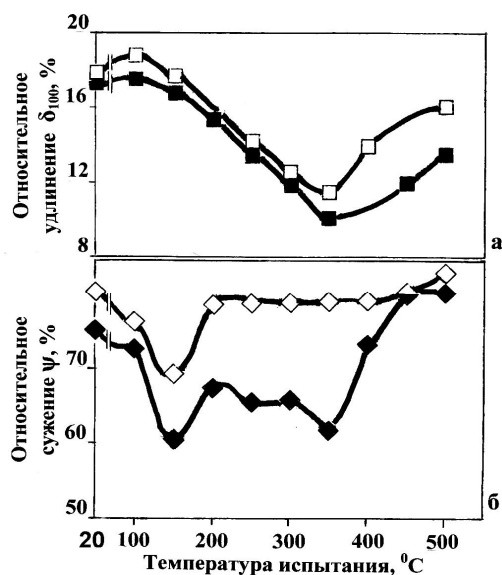


Рис. 1. Изменение прочностных свойств – временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  (а) и предела текучести  $\sigma_T$  (б) катанки диам. 5,5 мм из стали Св-08Г2С с бором и без бора (светлые и зачерненные обозначения соответственно) в зависимости от температуры при испытаниях на растяжение

Интересными представляются особенности изменения пластических свойств. Представленные на рис. 2 температурные зависимости изменения  $\delta_{100}$  и  $\psi$  для катанки из стали Св-08Г2С без бора и с бором существенно различаются. При этом наблюдающийся для

катанки из стали Св-08Г2С с бором стабильный уровень значений  $\psi$  на уровне 77–80% в интервале температур 200–450°C (рис. 2, б), наиболее опасном с точки зрения снижения технологической пластичности металла при волочении (до этих температур и нагреваются поверхностные зоны катанки при волочении), как раз и является тем важнейшим фактором, который объясняет наблюдающуюся на практике, в процессе переработки промышленных партий, высокую способность к деформационному формоизменению катанки из указанной стали.



**Рис. 2. Изменение пластических свойств (а, б – относительного удлинения и сужения соответственно) в образцах катанки диам. 5,5 из стали Св-08Г2С с бором и без бора (светлые и зачерненные обозначения соответственно) в зависимости от температуры при испытаниях на растяжение**

Как следует из рис. 2, б, для катанки из стали Св-08Г2С без бора в интервале температур 200–450°C наблюдается пониженный уровень значений  $\psi$ .

Согласно данным проведенного в [8] анализа, катанка из стали Св-08Г2С без бора и с бором характеризуется так называемой мультифазной исходной структурой, в ферритной матрице которой с полигональным зерном феррита 9-го номера по ГОСТ 5639 равномерно распределяются островковые участки перлита, бейнита и мартенсита [8]. Можно предположить, что наблюдающееся уже при температурах 100–150°C устойчивое снижение прочностных свойств связано с перераспределением напряжений между составляющими этой мультифазной структуры. Более существенное снижение прочностных свойств и достаточно стабильный уровень  $\psi$  в интервале температур 200–450°C катанки из стали Св-08Г2С, микролегированной бором, связаны с факторами уменьшения концентрации твердорастворного азота в результате его связывания бором в боросодержащие соединения, повышения предельной растворимости С в феррите

стали и снижения степени блокировки дислокаций атомами С. Последнее обстоятельство может быть вызвано, как указано выше, увеличением объема тетраэдрических пор в ОЦК решетке феррита стали в результате замещения в ней атомов железа атомами бора и изменения характера межатомного взаимодействия С, N, В и Fe.

Полученные данные позволяют, таким образом, утверждать, что микролегирование бором дезактивирует развитие процессов с.д.с. и д.д.с. в углеродистых и низ-колегированных сталях. Показано, что менее выраженная степень развития д.д.с. как раз и определяет более высокую технологичность при переделе волочением катанки из микролегированной бором стали Св-08Г2С по сравнению с катанкой из аналогичной стали без бора.

#### Список литературы

1. Структура и свойства канатной катанки-проволоки из непрерывнолитой стали 70, микролегированной бором / В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, И.В. Деревянченко, А.Б. Сычков, Л.И. Демьянова, Р.В. Старов. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. трудов*. Киев: Наук. думка, 1998. С. 383-388.
2. Структура и свойства катанки из боросодержащих сталей, предназначенной для изготовления сварочной проволоки/В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 3. С. 48-51.
3. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова и др. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
4. Высокоуглеродистая катанка для изготовления высокопрочных арматурных канатов / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, А.В. Перегудов. Бендеры: Полиграфист, 2010. 280 с.
5. Фетисов В.П. Деформационное старение стали при волочении проволоки. Минск: Белгостанкинпромпиздат, 1996. 121 с.
6. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320 с.
7. Нестеренко А.М., Сычков А.Б. Размерно-геометрические аспекты легирования стали бором и медью // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. трудов*. Днепропетровск: Визин, 2004. Вып. 7. С. 181-183.
8. Тонкая микроструктура катанки из стали Св-08Г2С повышенной деформируемости / Нестеренко А.М., Сычков А.Б., Жукова С.Ю., Сухомлин В.И. // *Металлург*. 2008. № 9. С. 48-51.

#### Bibliography

1. Structure and properties of rod-wire cable from continuous steel 70, microalloyed with boron/V.V. Parusov, A.M. Nesterenko, I.D. Derevyanchenko, A.B. Sychkov, L.I. Demyanova, R.V. Starov. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy. Sat scientific papers*. Kiev: Naukova Dumka, 1998. S. 383-388.
2. Structure and properties of boron-containing steel rods, designed for the manufacture of welding wire / V.V. Parusov, A.M. Nesterenko, A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev. *Metals and Mining Industry*. 2000. № 3. S. 48-51.
3. Structure and properties of wire rod for the manufacture of electrodes and welding wire/ A.B. Sychkov, V.V. Parusov, A.M. Nesterenko, S.Yu. Zhukova etc. Bender: Polygraphist, 2009. 608s.
4. High-rod for the manufacture of high-strength reinforcing ropes / A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, A.M. Nesterenko, S.Yu. Zhukova, A.V. Peregudov. Bender: Polygraphist, 2010. 280 p.
5. Fetisov V.P. Strain aging of steel in wire drawing. Minsk: Belgostankinpromizdat, 1996. 121 p.
6. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.E. Strain aging of steel. Moscow: Metallurgiya, 1972. 320.
7. Nesterenko A.M., Sychkov A.B. Size-geometric aspects of steel alloying with boron and copper. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy. Sat scientific papers*. Dnepropetrovsk: Vision, 2004. Vol. 7. P. 181-183.
8. Microstructure of a thin rod of steel Sv-08G2S high deformability / Nesterenko A.M., Sychkov A.B., Zhukov S.Yu., Sukhomlin V.I. // *Metallurg*. 2008. № 9. P. 48-51.