



ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л. И. МИХОДУЙ, В. И. КИРЬЯН, доктора техн. наук, В. Д. ПОЗНЯКОВ, канд. техн. наук, П. А. СТРИЖАК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. В. СНИСАРЕНКО, инж. (ОАО «Укрстальконструкция», г. Киев)

Приведены результаты анализа свойств и свариваемости двух экономнолегированных высокопрочных сталей марок 06Г2Б и 09Г2СЮч ($\sigma_T \geq 440$ МПа). Оценена перспективность их использования при изготовлении уникальных и надежных строительных конструкций различного назначения (мосты, башни, сосуды для работы под давлением, резервуары).

Ключевые слова: высокопрочные стали, свариваемость, прочностные свойства, хладостойкость, замедленное разрушение

Рациональное использование современных микролегированных материалов с высокими показателями механических свойств позволяет эффективно снижать металло- и энергоемкость, повышать надежность и долговечность, расширять технические возможности инженерных сооружений и решать новые задачи без технического перевооружения производства. В экономически развитых странах для этой цели уже сейчас используется новое поколение сталей с пределом текучести 600...800 МПа [1, 2], рассматривается вопрос об использовании в строительных сооружениях еще более прочных материалов [3]. Такие стали в основном содержат до 0,12% углерода, ограниченное количество марганца, молибдена, ниобия, титана, бора. Для достижения требуемого комплекса их свойств используют как термическую, так и термомеханическую обработку (контролируемую прокатку). В отдельных случаях в эти стали вводят никель, хром, медь или другие элементы (в суммарном количестве до 2...3%).

Несомненным достоинством данных конструкционных сталей является их высокие надежность, хладостойкость, хорошая свариваемость, достигаемая в результате более экономного легирования, по сравнению с известными материалами. В то же время в связи с последним обстоятельством эти стали представляют специфическую группу материалов, поскольку в процессе технологических переделов при производстве металлоконструкций может снижаться сопротивляемость сварных соединений замедленному и хрупкому разрушениям [4].

К сожалению, в отечественной практике при изготовлении уникальных и крупных строительных сооружений до настоящего времени используют преимущественно низколегированные стали с пределом текучести до 350 МПа [5]. Учитывая зарубежный опыт, можно предположить, что в ближайшее время они в отдельных случаях будут неконкурентоспособными не только в дальнем или ближнем зарубежье, но и в нашей стране. В значительной степени этому способствует тот факт,

что в Украине отмечают лишь отдельные попытки создания и освоения производства новых, более прочных и перспективных конструкционных материалов.

Цель настоящей работы состояла в детальном анализе свойств и свариваемости двух отечественных экономнолегированных высокопрочных марок сталей (ниобийсодержащей 06Г2Б и микролегированной 09Г2СЮч с $\sigma_T \geq 440$ МПа) применительно к оценке перспективности их использования при изготовлении уникальных и надежных строительных конструкций различного назначения (мосты, башни, сосуды, работающие под давлением, резервуары).

Состав и свойства сталей. Требования к составу и свойствам исследуемых сталей, согласно техническим условиям, приведены в табл. 1. Там же для сравнения представлены данные о широко известных сталях марок 10ХСНД и 16Г2АФ (с пределом текучести ≥ 390 и ≥ 440 МПа).

В соответствии с ТУУ 14-16-150-99 ниобийсодержащие стали марок 06ГБ и 06Г2Б (разработаны Мариупольским институтом конструкционных материалов «Прометей») классов прочности С 355–С 490 поставляются в листах толщиной 8...50 мм. При этом путем варьирования режимов термической обработки регулируется получение четырех уровней прочностных свойств ($\sigma_T \geq 355, 390, 440$ и 490 МПа; $\sigma_B \geq 450, 490, 540$ и 590 МПа) при практически одинаковых показателях пластичности и ударной вязкости. Поставка сталей может осуществляться с гарантированными показателями сужения по оси Z и сплошности (по заявке класса 0). При проведении настоящих исследований была использована сталь класса прочности С 440 толщиной 30 мм, $\sigma_T \geq 440$ МПа класса сплошности 0.

Сталь марки 09Г2СЮч может поставляться по ТУУ 322-16-127-97 в листах толщиной 8...40 мм. При этом в зависимости от толщины и способов термической обработки может обеспечиваться различный уровень свойств проката: $\sigma_T = 325...450$ МПа; $\sigma_B = 480...570$ МПа, $\sigma \geq 19\%$; $KCV \geq 29$ и $KCV \geq 29$ Дж/см² при температурах $-40...-70$ °С. Базовой для исследований служила сталь марки 09Г2СЮч толщиной 18 мм, $\sigma_T \geq 450$ МПа.

Таблица 1. Состав и свойства конструкционных сталей повышенной и высокой прочности

Марка стали	Массовая доля элементов, %															C ₃ , %	σ _r	σ _b	δ ₅ , %	KCU ₋₇₀	KCV ₋₇₀
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Nb	V	Ce	N ₂	S	P						
06Г2Б	0,04...0,08	0,15...0,35	1,3...1,6	—	—	0,05...0,08	0,15...0,3	0,02...0,05	< 0,02	0,03...0,05	—	—	< 0,012	< 0,01	< 0,02	0,33...0,43	440	540	22	—	59
09Г2СЮч	0,08...0,11	0,3...0,6	1,9...2,2	—	—	—	0,3...0,6	0,035...0,065	—	—	—	0,002...0,005	—	< 0,015	< 0,02	0,41...0,51	450	570	19	29	29
10ХСНД	≤ 0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,6...0,9	0,5...0,8	—	0,4...0,65	—	—	—	—	—	—	< 0,035	< 0,035	0,35...0,52	390	530...660	19	29	—
16Г2АФ	0,14...0,2	0,3...0,6	1,3...1,7	≤ 0,4	≤ 0,3	—	0,15...0,3	—	—	—	0,08...0,14	—	0,015...0,025	< 0,035	< 0,035	0,40...0,62	440	590	20	29	—

Таблица 2. Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %														
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Nb	N ₂	Ce	S	P	
06Г2Б	0,08	0,27	1,5	—	—	0,19	0,23	0,04	0,013	0,047	0,008	—	0,006	0,011	
09Г2СЮч	0,097	0,36	1,9	—	—	—	0,39	0,06	—	—	Не опр.	0,004	0,01	0,015	
10ХСНД	0,091	0,98	0,7	0,77	0,8	—	0,37	—	—	—	Не опр.	—	0,018	0,012	

Таблица 3. Механические свойства исследуемых сталей

Марка стали	σ_t	σ_b	δ_5	ψ	KCV, Дж/см ² , при T _{исп.} , °C		
	МПа		%		+20	-40	-70
06Г2Б	458	582	34	84	> 300	> 300	> 300
09Г2СЮч	468	593	31	79	$\frac{210...260}{234}$	$\frac{170...216}{196}$	$\frac{146...179}{160}$
10ХСНД	408	580	26	75	$\frac{30...43}{39}$	$\frac{18...23}{21}$	$\frac{10...16}{13}$

Примечание. В числителе приведен разбег, в знаменателе — среднее значение.

Ориентировочным показателем свариваемости сталей обычно служит углеродный эквивалент C_e , расчетная формула которого предложена Международным институтом сварки (МИС). Из сталей, приведенных в табл. 1, наиболее высокое значение C_e имеет сталь 16Г2АФ. По этой причине сварка указанной стали сопряжена с определенными трудностями. Опыт изготовления конструкций из этой стали полностью подтверждает данные работ [6, 7]. Поэтому в наших исследованиях для сопоставления в качестве базовой была использована сталь марки 10ХСНД ($C_e = 0,35...0,52\%$), рекомендованная к применению при изготовлении тяжело нагруженных конструкций широкого назначения. Из исследуемых материалов наиболее низкие значения углеродного эквивалента ($C_e = 0,33...0,43\%$) у стали 06Г2Б классов прочности С 440 и С 490. Показатель C_e стали 09Г2СЮч несколько выше (0,41...0,51%) и по своему уровню полностью совпадает с таковым стали 10ХСНД.

Химический состав и механические свойства базовой и исследуемых сталей приведены в табл. 2 и 3. Обращает внимание существенное превышение нормативных показателей пластичности δ_5 , ψ и ударной вязкости KCV в исследуемых сталях. Это характерно для современных микролегированных сталей в связи со значительным измельчением зерна и снижением содержания вредных примесей (серы, фосфора).

Обе эти стали технологичны при изготовлении металлоконструкций (допускают применение всех видов механической обработки и технологических операций, связанных с пластическими деформированием, — гибка, вальцовка, штамповка и т. п.).

Влияние термических циклов сварки на свойства металла ЗТВ. В околошовной зоне экономнолегированных сталей при замедленных скоростях охлаждения ($w_{6/5} < 3...5\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) возможно образование бейнитно-мартенситных структур, содержащих значительное количество ферритной составляющей [4, 5, 8]. Неблагоприятные соотношения этих компонентов микроструктуры могут приводить к снижению прочности и пластичности металла как зоны термического влияния (ЗТВ), так и всего сварного соединения в целом.

Поэтому представлялось целесообразным проведение специальных исследований по выбору оптимальных условий охлаждения металла ЗТВ исследуемых сталей. Для этого использовали имитационные образцы размером 13×13×150 мм, которые обрабатывали на установке МСР-75 [9] в соответствии с различными термическими циклами

сварки (ТЦС). Из этих заготовок были изготовлены стандартные образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб.

В процессе исследований условия обработки заготовок выбирали такими, чтобы они позволяли имитировать условия формирования металла околошовной зоны сварных соединений — нагрев до температур 1300...1350 °C и последующее охлаждение с различными скоростями — $w_{6/5} = 2,5...25,0\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ (в интервале температур 600...500 °C).

Результаты выполненных исследований дали возможность установить оптимальные с точки зрения различных способов сварки режимы и условия ведения работ. Для всех исследуемых сталей определены минимальные скорости охлаждения, при которых не происходит существенного снижения уровня хладостойкости, предела текучести и пластичности металла ЗТВ. Отмечено, что степень влияния ТЦС на каждую из исследуемых сталей оказывается различной.

В ниобийсодержащей 06Г2Б и низколегированной 10ХСНД сталях при замедленных скоростях охлаждения предел текучести металла ЗТВ может снижаться до 8...10% по сравнению с аналогичными показателями основного металла. У стали 09Г2СЮч в этом случае снижение σ_t значительно больше (до 26...28%). При замедленных скоростях охлаждения у сталей 09Г2СЮч и 10ХСНД зафиксирована тенденция к ухудшению пластичности (относительного сужения) металла ЗТВ. При этом на временное сопротивление σ_b данных материалов ТЦС практически не влияет. В целом исследования позволили установить оптимальный диапазон скоростей охлаждения, при которых показатели прочности и пластичности металла ЗТВ у рассматриваемых сталей остаются стабильными.

Как правило, под воздействием ТЦС происходит существенное ухудшение хладостойкости металла ЗТВ экономнолегированных сталей по сравнению с аналогичными показателями основного металла [10].

Следует отметить, что стали марок 09Г2СЮч и 06Г2Б по уровню хладостойкости металла ЗТВ отличаются несущественно (соответственно $KCV_{-40} \geq 27$ и ≥ 35 Дж/см²).

Сталь 10ХСНД по показателям хладостойкости металла ЗТВ уступает обоим исследованным экономнолегированным сталям ($KCV_{-40} \geq 15$ Дж/см²). Необходимо подчеркнуть, что эта сталь имеет низкие значения ударной вязкости при отрицательных температурах и в исходном состоянии (табл. 3).

Более полное представление о хладостойкости сварных соединений исследуемых экономнолегированных сталей можно получить из результатов исследований крупногабаритных образцов, выполненных в соответствии с рекомендуемыми технологиями, подходами и критериями механики разрушения.

Сопротивляемость исследуемых сталей замедленному разрушению. Замедленное разрушение сварных соединений обычно является опасным дефектом конструкций из сталей повышенной и высокой прочности. Их образование вызывают сле-

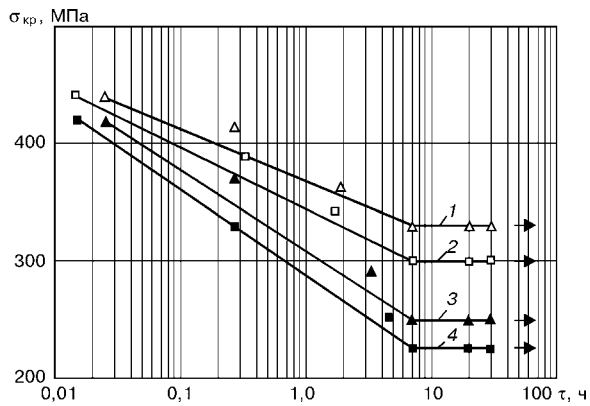


Рис. 1. Влияние насыщенности металла швов водородом при интенсивной скорости охлаждения на склонность к замедленному разрушению образцов Имплант из сталей 09Г2СЮч (1, 3) и 10ХСНД (2, 4): 1, 2 — $[H]_{диф} = 10$; 3, 4 — 16 мл/100 г

дующие факторы: мартенситная и бейнитная составляющие в микроструктуре металла ЗТВ; диффузионный водород; остаточные сварочные напряжения I рода.

Наиболее полное представление о роли первых двух факторов и частично третьего в замедленном разрушении сварных соединений конструкционных сталей можно получить при испытании образцов по методу Имплант, использование которого рекомендовано МИС [11].

Из сталей 06Г2Б, 09Г2СЮч и 10ХСНД были подготовлены образцы-вставки диаметром 6 мм и плиты размером 200×300 мм. В качестве базовых использовали электроды марки УОНИ-13/55 диаметром 4 мм. Регулирование условий их хранения и прокатки позволяло воспроизводить такие пределы содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, которые наиболее часто имеют место при сварке конструкций в реальных условиях: $[H]_{диф} = 5...16$ мл/100 г (при анализе его содержания хроматографическим методом). Варьировали и режимы сварки образцов, посредством которых регулировалась скорость охлаждения металла ЗТВ проб Имплант в достаточно широких пределах ($w_{6/5} = 8...26$ °C/с). За показатель трещиностойкости принимали критическое растягивающее напряжение $\sigma_{кр}$ конкретного технологического варианта, при котором металл ЗТВ сопротивляется образованию холодных трещин. В каждом случае в качестве критерия служило и максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{кр.макс}$ от внешней нагрузки P , при котором в образцах Имплант не образовывались трещины в течение 20 ч. Оптимальные режимы сварки конкретного технологического варианта выбирались в соответствии с условием, при котором $\sigma_{кр.макс} > (0,75...0,80) \sigma_{0,2}$ основного металла.

Исследования показали, что сталь марки 06Г2Б отличается достаточно высокой сопротивляемостью замедленному разрушению. Даже при неблагоприятных условиях испытаний ($w_{6/5} \approx 26$ °C/с, $[H]_{диф} \approx 16$ мл/100 г) образцы Имплант из этой стали не разрушались в течение 20 ч при $\sigma_{кр} = 360$ МПа, что составляет примерно $0,77\sigma_{0,2}$.

Сопротивляемость замедленному разрушению остальных двух сталей зависит от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле. Ес-

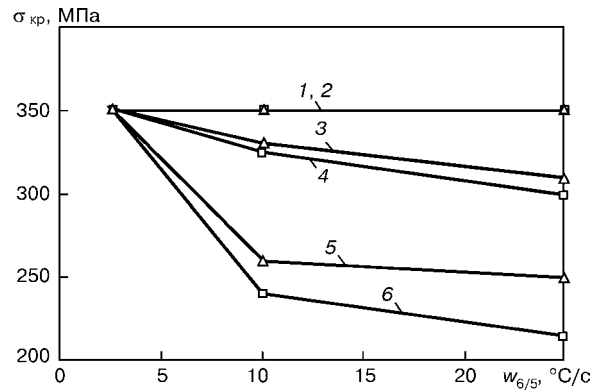


Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на $\sigma_{кр}$ образцов Имплант из сталей 09Г2СЮч (1, 3, 5) и 10ХСНД (2, 4, 6) при различном содержании диффузионного водорода: 1, 2 — $[H]_{диф} = 5...7$; 3, 4 — 9...10; 5, 6 — 15...16 мл/100 г

ли концентрация $[H]_{диф}$ ограничивалась 5...7 мл/100 г, образцы Имплант из сталей 09Г2СЮч и 10ХСНД не разрушались при нагрузках $\sigma_{кр} > 0,7$ пределов текучести соответствующих сталей. При повышении концентрации водорода выше этого уровня показатели $\sigma_{кр}$ у обеих сталей снижаются. В значительной степени это относится к стали 10ХСНД, что свидетельствует о ее большей склонности к замедленному разрушению по сравнению со сталью 09Г2СЮч.

Результаты испытаний образцов Имплант из этих сталей при наиболее интенсивном охлаждении металла ЗТВ ($w_{6/5} = 25...26$ °C/с) представлены на рис. 1.

Обобщенные результаты влияния скорости охлаждения металла ЗТВ сталей 09Г2СЮч и 10ХСНД при различной концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле на $\sigma_{кр}$ образцов Имплант приведены на рис. 2. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что по сопротивляемости замедленному разрушению экономнолегированные высокопрочные стали марок 06Г2Б и 09Г2СЮч при сопоставимых условиях изготовления конструкций превосходят хорошо известную сталь повышенной прочности марки 10ХСНД. При этом условия их использования, по-видимому, должны выбираться таким образом, чтобы содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышало 8...9 мл/100 г, а скорость охлаждения металла ЗТВ составляла < 30 °C/с.

Сопротивляемость сталей слоистому (ламельному) разрушению. Для листового проката конструкционных сталей характерна анизотропия пластичности и вязкости. Она выражается в заметном ухудшении этих свойств при переходе от продольного направления к поперечному и в резком их ухудшении в направлении толщины (направление Z), что обычно связывают с наличием в стали неметаллических включений главным образом вытянутых тонких сульфидов. Низкие значения пластичности и вязкости в сочетании с возникающими в направлении Z усилиями в сварных узлах металлоконструкций, преимущественно с тавровыми, угловыми и нахлесточными соединениями, являются главной причиной образования слоистых (ламелярных) трещин.



Однако новое поколение сталей в процессе изготовления чаще всего подвергается различным видам рафинирующей обработки и, как правило, содержит ограниченное количество серы. Поэтому их роль в слоистом разрушении может уменьшаться. По-видимому, при анализе слоистых разрушений таких сталей целесообразно учитывать возможную роль в этом процессе нитридных включений, которые имеют иглообразную форму. Конструкционные стали нового поколения в большинстве случаев содержат азот и нитридообразующие элементы (алюминий, ванадий, ниобий, титан др.). Образованию нитридных включений в таких сталях могут способствовать и особенности процесса их производства. Требуемый комплекс свойств в них формируется при охлаждении или термической обработке металла [12, 13]. Поэтому желательно, чтобы технические условия на изготовление указанных сталей, а также сертификаты качества обязательно содержали информацию об относительном сужении, что нашло отражение в ТУУ 14-16-150-99 и ТУУ 322-16-127-97.

При проведении настоящих исследований из всех трех сталей в соответствии с ГОСТ 28870-90 были изготовлены специальные стыковые соединения, из которых затем вырезались и испытывались на растяжение цилиндрические образцы. Результаты исследований показали, что сталь 10ХСНД неудовлетворительно сопротивляется образованию ламелярных трещин, поскольку ее относительное сужение очень низкое ($\psi_z \approx 9...10\%$). Экономнолегированные стали 06Г2Б и 09Г2СЮч отличаются высокой сопротивляемостью образованию слоистых трещин ($\psi_z = 27...37\%$). По этому показателю они значительно превосходят сталь марки 10ХСНД.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что экономнолегированные стали марок 06Г2Б и 09Г2СЮч ($\sigma_T = 440...450$ МПа) обеспечивают высокие показатели хладостойкости при температурах до -70°C на образцах с острым надрезом типа Шарпи и по ряду показателей свариваемости (влияние ТПС на свойства металла ЗТВ, сопротивляемость замедленному и ламелярному разрушениям) значительно превосходят конструкционную сталь марки 10ХСНД ($\sigma_T = 390$ МПа).

Выводы

1. Экономнолегированные стали марок 06Г2Б и 09Г2СЮч по показателям служебных свойств полностью отвечают требованиям, предъявляемым к сталям уровня прочности $\sigma_T \geq 440$ МПа и европейских норм. При этом следует отметить их высокую хладостойкость при температурах $-40...-70^\circ\text{C}$ на образцах с острым надрезом типа Шарпи ($KCV = 150...300$ Дж/см²).

Results of analysis of properties and weldability of sparsely alloyed high-strength steels of the 06G2B and 09G2SYuch ($\sigma_T \geq 440$ MPa) are given. The prospects of utilising them for the fabrication of unique and reliable different-application engineering structures (bridges, towers, pressure vessels, tanks) have been estimated.

2. В оптимальном диапазоне скоростей охлаждения металл ЗТВ исследованных сталей обеспечивает необходимые прочностные свойства и хладостойкость ($KCV \geq 27$ и ≥ 35 Дж/см² при температурах до -40°C для сталей соответственно 09Г2СЮч и 06Г2Б). В перспективе такие исследования предполагается дополнять испытаниями сварных соединений полной толщины с использованием подходов и критериев механики разрушения.

3. Для снижения вероятности замедленного разрушения соединений сталей 06Г2Б и 09Г2СЮч необходимо ограничивать содержание диффузионного водорода в наплавленном металле и скорость охлаждения металла ЗТВ.

4. Исследованные партии сталей 06Г2Б и 09Г2СЮч обеспечивают весьма высокие значения сужения в направлении толщины ($\psi_z = 27...37\%$), что создает предпосылки для их высокой сопротивляемости ламелярному разрушению.

1. Fisher J. W., Dexter R. J. High-performance steel for America's bridges // Welding J. — 1994. — № 1. — P. 35-43.
2. Recently developed structure steel for use in civil engineering and construction / S. Tani, V. Kaneko, M. Jshiguro, M. Ohama // NKK Technical Review. — 1996. — № 74. — P. 17-25.
3. Neues in der Schweisstechnik 1998 / E. H. Herold, M. Zinke, H. Zwickert et al. // Schweissen und Schneiden. — 1999. — № 5. — S. 266-288.
4. Weldability of low-carbon micro-alloyed steels for marine structures / C. D. Lundin, T. P. S. Gill, C. Y. P. Qino et al. // WRS Bulletin. — 1990. — № 359. — P. 100.
5. Сварные строительные конструкции: В 3 т. Т. 1: Основы проектирования конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.
6. Жизняков С. Н., Конопатов В. С., Лялин К. В. Причины образования дефектов в сварных соединениях металлоконструкций ККЦ Магнитогорского металлургического комбината // ЭИ «Монтажные и специальные строительные работы». Сер. Изготовление металлических и монтажно-строительных конструкций. — 1988. — № 11. — С. 1-5.
7. Тишаев С. И., Одесский П. Д. Низколегированные стали нового поколения для металлических конструкций // Металлы. — 2001. — № 7. — С. 56-64.
8. Влияние термического цикла сварки на структуру и вязкость металла ЗТВ термически упрочненной стали 09Г2С / Ю. В. Демченко, А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко и др. // Автомат. сварка. — 1986. — № 11. — С. 10-13.
9. Имитация термического цикла сварки в зоне термического влияния при электрошлаковой сварке модулированным током / В. А. Сидорук, Д. А. Дудко, Н. В. Горбенко и др. // Там же. — 1985. — № 7. — С. 12-15.
10. Brozda J., Zeman M. Weldability evaluation of a modern TMCR steel by using simulation techniques // Acta Metallurgica Sinica. — 2000. — № 1. — P. 103-111.
11. Recommendation for the use of implant test as a complementary information test on the cold cracking susceptibility during the welding of steel. — S. l., [1973]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIV-IX-830-73).
12. Явойский В. И., Рубешич Ю. И., Океико А. П. Неметаллические включения и свойства стали. — М.: Металлургия, 1980. — 173 с.
13. Гривняк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.

Поступила в редакцию 15.10.2002