РИСК ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины В. И. МАХНЕНКО, В. Д. ПОЗНЯКОВ, канд. техн. наук, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена математическая модель риска образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей на основе распределенных данных, касающихся состояния микроструктуры, содержания диффузионного водорода и напряженного состояния в элементарных объемах в зоне сварного соединения. Показана возможность на основе предлагаемой модели более прецизионно оценить локальные условия образования холодных трещин по указанным параметрам.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированные высокопрочные стали, хрупкое разрушение, холодные трещины, диффузионный водород, микроструктура, напряженное состояние, вероятностная модель

Известно, что необходимыми условиями для образования холодных (водородных) трещин при сварке конструкционных сталей является наличие в зоне потенциального их образования закалочных структур, диффузионного водорода и растягивающих напряжений [1]. Что касается количественных характеристик указанных условий, то с учетом локальности процесса образования трещин, наличия значительного градиента изменения этих характеристик в зоне сварочного нагрева, их сильного взаимного влияния и других факторов пока можно только достаточно приближенно судить о критических значениях соответствующих характеристик, ограничивая их экстремальные проявления практически без учета взаимного влияния. Между тем, развитие методов (как экспериментальных, так и расчетных) вычисления распределенных параметров указанных характеристик при сварке различных соединений конструкционных сталей, а также стремление к оптимизации технологических мероприятий по предупреждению образования холодных трещин требуют построения более прецизионных критериев риска их образования.

Можно показать, что многие современные подходы [1], основанные на таких интегральных характеристиках, как эквивалент углерода в зоне термического влияния (ЗТВ), содержание водорода в присадочном металле, степень закрепления и свариваемые толщины в качестве количественных условий по микроструктуре, диффузионному водороду и действующим напряжениям, являются весьма общими и далеко не однозначно определяют при конкретных режимах сварочного нагрева количественные характеристики необходимых условий образования холодных трещин. В последние десятилетия благодаря развитию компьютерных систем «Sysweld» и других их типов, с помощью которых получают расчетную информацию о распределенных характеристиках в металле шва и ЗТВ относительно условий образования холодных трещин, доказано, что далеко не всегда зоны потенциальных холодных трещин имеют наиболее экстремальные сочетания по объему закалочных микроструктур, содержанию диффузионного водорода и уровню растягивающих напряжений. Часто зоны с максимальными объемом мартенсита и содержанием диффузионного водорода находятся в зонах сжатия, либо зоны с высокими растягивающими напряжениями имеют чисто бейнитную микроструктуру и низкий уровень диффузионного водорода, т. е. не являются потенциальными очагами холодных трещин. Иными словами, необходимы соответствующие физически обоснованные критерии, связывающие количественно на уровне распределенных параметров необходимые условия образования холодных трещин при сварочном нагреве рассматриваемых конструкционных сталей.

Ниже предлагается подход для построения таких критериев, в основу которого положены следующие факторы:

вероятностная оценка риска образования холодных трещин выполняется в конкретной области сварного соединения (определенный участок зоны плавления либо 3TB);

зарождение и развитие холодных трещин происходит по механизму хрупкого разрушения, т. е. определяется соответствующими нормальными напряжениями $\sigma_{jj}(x, y, z)$ в точке с координатами x, y, z, действующими на площадке с нормалью j и соответствующей характеристикой сопротивления материала $A_j(x, y, z)$ образованию хрупкого разрушения;

© В. И. Махненко, В. Д. Позняков, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, 2009

ADDREAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

А_j является для данной стали функцией микроструктурного состояния и содержания диффузионного водорода.

Вероятность хрупкого разрушения в конкретном объеме V в соответствии с теорией Вейбулла определяется зависимостью

$$P_{j}(V) = 1 - \exp\left[-\int_{V} \left(\frac{\sigma_{jj} - A_{j}}{B_{j}}\right)^{\eta} dV / V_{0}\right], \quad (\sigma_{jj} > A_{j}). \quad (1)$$

В (1) интегрирование производится только по элементарным объемам dV, где $\sigma_{jj} > A_j$, A_j , η , $B_j V_0^{1/\eta}$ — параметры распределения Вейбулла. Как правило, $\eta = 4,0, A_j$ и $\overline{B}_j = B_j V_0^{1/\eta}$ определяются опытным путем.

Значения $\overline{B_j}$ зависят от размеров объема Vвдоль сечения с нормалью j (рис. 1). Если на длине l_j этого объема напряжения σ_{jj} и сопротивляемость материала A_j изменяются мало, то в интеграле выражения (1) можно выполнить замену $dV = l_j dF$, где F — площадь поперечного сечения объема V.

Соответственно вместо (1) получим

$$P_{j} = 1 - \exp\left[-\int_{F} \left(\frac{\sigma_{jj} - A_{j}}{\overline{B}_{j} / l_{j}^{1/\eta}}\right)^{\eta} dF\right].$$
 (2)

Откуда

$$P_{j}(l_{j}) = 1 - [1 - P_{j}(l_{0})] \left(\frac{l_{0}}{l_{j}}\right)^{1/\eta},$$
(3)

где $P_i(l_0)$ — вероятность появления холодных трещин в плоскости с нормалью j на длине l_0 объема V. В частном случае, когда нормаль *j* направлена поперек сварного шва, то l_i и l₀ — длина объема V вдоль сварного шва и речь идет о продольных трещинах А, если ј направлена вдоль сварного шва, то l_i и l_0 — длина потенциального объема V расположена поперек сварного шва и речь идет об образовании поперечных холодных трещин. Из (2) и (3) можно видеть, что, если чувствительность материала к образованию поперечных и продольных холодных трещин отличается несущественно, т. е. значения параметров А, В, h для поперечных и продольных трещин примерно одинаковые, то вероятность образования продольных либо поперечных холодных трещин зависит не только от



Рис. 1. Схема образования холодных трещин в зонах плавления (ЗП) и термического влияния (ЗТВ): *1* — продольная с нормалью *y*; *2* — поперечная с нормалью *x*; *3* — подваликовая с нормалью *z* (продольной)

уровня поперечных и продольных нормальных напряжений, но и от значений l_j в потенциальном объеме V в соответствующем направлении. Поэтому вполне естественно, что в ЗТВ возникают продольные холодные трещины при поперечных напряжениях значительно ниже таковых в продольном направлении.

Из изложенного выше следует, что при известных значениях параметров *A*, *B*, η, зависящих в основном только от микроструктуры и концентрации диффузионного водорода, а также от распределения напряжений в зоне соединения, по



Рис. 2. Схема корневого шва с поперечными (1) и продольными (2, 3) трещинами в сварочной пробе (4) толщиной δ и шириной 2L, закрепленной фланговыми швами к плите (5) толщиной $\delta_{\rm n} >> \delta$

Таблица 1. Химический состав (мас. %) основного и наплавленного электродами металла

Материал	С	Si	Mn	Cr	Cu	V	Al	Р	S
Сталь 14ХГ2САФД	0,13	0,57	1,42	0,44	0,39	0,08	0,08	0,019	0,015
Электрод АНП-10	0,09	0,43	1,90	Следы	Следы	0,01	—	0,020	0,020

THE REPORT OF TH

уравнению (2) можно рассчитать вероятность образования холодных трещин в различных сечениях с нормалью *j*.

Ниже показано применение изложенного подхода для описания условий образования холодных трещин при сварке корневого прохода стыкового шва в типичной сварочной пробе (рис. 2) из стали 14ХГ2САФД толщиной $\delta = 18$ мм, а также представлена термокинетическая диаграмма превращения аустенита (рис. 3). При этом применяли дуговую сварку электродами АНП-10. Химический состав основного и присадочного металла приведен в табл. 1.

На рис. 2 варьируемыми условиями сварки стыкового шва пробы являлись начальная температура подогрева T_0 , содержание водорода в присадочном металле H_{npuc} и база закрепления L. Дуговую сварку корневого прохода выполняли на режиме: I = 140...150 А; $U_{\pi} = 24$ В; $v_{cB} =$ = 7,2...7,5 м/ч. В табл. 2 приведены значения варьируемых параметров T_0 , H_{npuc} , L для различных вариантов сварки стыкового шва.

По каждому варианту выполняли сварку десяти образцов, по результатам обследования которых определяли вероятность появления холодных трещин, типа показанных на рис. 4. Дальнейшие исследования, связанные с определением температурных полей при сварке, микроструктурных изменений, диффузии водорода и напряжений в ЗП и ЗТВ, проводили численными методами на основе соответствующих математических моделей, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона



Рис. 3. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в стали 14ХГ2САФД



Рис. 4. Макрошлиф поперечного сечения шва после корневого прохода в исследуемой пробе при L = 50 мм и $T_0 = 11$ °C



Рис. 5. Распечатка расчетных значений $V_{\rm M}$ в поперечном сечении корневого шва при L = 50 мм и $T_0 = 11$ (*a*), 70 (*б*), 90 (*в*) и 120 (*г*): I — граница 3П; 2 — граница 3ТВ; 3 — граница, где $V_{\rm M} \ge 0,5$

ADDREAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Таблица 2. Варианты испытаний на образование холодных [2]. В основу этих моделей положен принцип

№ вари- анта	2 <i>L</i> , мм	<i>T</i> ₀ , °C	Н _{3прис} , см ³ /100 г	Количество образцов без трещин	Вероят- ность разрушения	V _M
1	100	11	4,0	10	0	0,89
2	100	11	6,0	5	0,5	0,89
3	100	11	7,0	0	1,0	0,89
4	100	11	8,6	0	1,0	0,89
5	140	11	8,6	4	0,6	0,89
6	200	11	8,6	9	0,1	0,89
7	100	70	8,6	2	0,8	0,72
8	100	90	8,6	_		0,65
9	100	120	8,6	10	0	0,50





AUTROCATICHTERCAR

[2]. В основу этих моделей положен принцип последовательного прослеживания развития температурных полей, микроструктурных изменений, напряжений и деформаций, а также диффузия водорода от соответствующего начального распределения в присадочном и основном металлах с учетом изменения растворимости и коэффициентов диффузии в зависимости от температуры, а также микроструктурных изменений [2].

Не останавливаясь на подробностях такого моделирования применительно к рассматриваемой стали, теплофизические и механические свойства которой достаточно известны [3], ниже приводим основные расчетные результаты, использованные для получения параметров модели образования холодных трещин (2) при сварочном нагреве рассматриваемой стали.

На рис. 5 приведены данные о распределении мартенсита в поперечном сечении корневого шва (на расстоянии от его начала и конца) при сварке. Поскольку при скорости охлаждения 600...500 °C $>7.8 \,^{\circ}{
m C/c}$ в интервале $W_{6/5}$ формируется в основном мартенситно-бейнитная структура (см. рис. 3), то данные, представленные на рис. 5, достаточно исчерпывающе характеризуют микроструктуру того объема (см. рис. 4), где образуется холодная трещина в зависимости от содержания водорода и напряжений. В частности, из рис. 5 следует, что при $T_0 = 11$ °C, которой соответствует $w_{6/5} \approx 25...35$ °C/с по термокинетической диаграмме (см. рис. 3), в металле 3TB содержание мартенсита составляет $V_{\rm M} = 0,70...0,90$, при $T_0 = 70$ °С $V_{\rm M} = 0,70...0,40$, при $T_0 = 90$ °С $V_{\rm M} = 0,65...0,35$, при $T_0 = 120$ °С, что соответствует $w_{6/5} \approx 10$ °С/с, $V_{\rm M} = 0,50...0,20$.

Что касается непосредственно зоны потенциального образования трещины (см. рис. 4), то содержание мартенсита по данным рис. 5 составляет $V_{\rm M} = 0,89, 0,72, 0,65, 0,50, т. е.$ соответствует классическим условиям появления холодных трещин при прочих необходимых условиях по водороду и напряжениям.

Рис. 6 дает представление о распределении диффузионного водорода к моменту времени ($t \approx 200$ с), когда создаются температурные условия для образования холодных трещин. Эти данные получены для исходного содержания водорода в присадочном металле $H_{npuc} = 10 \text{ см}^3/100 \text{ г.}$

Видно, что к моменту образования трещины реальное содержание диффузионного водорода в районе трещины (см. рис. 4) не превышает (3,5±0,5) см³/100 г, т. е. 35 % Н_{прис}, и мало зависит от значений T_0 в рассмотренных пределах. Отсюда следует, что по содержанию закалочных микроструктур (мартенсит, см. табл. 2) и исходному содержанию водорода Н_{прис} = 7,0...8,6 см³/100 г, ко-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 7. Распечатка расчетных значений σ_1 (*a*) и σ_{vv} (*б*) при *T*₀ = 11 °С и *L* = 50 мм (№ 1–4, табл. 2): *1–3* — см. рис. 5

торое по сравнению с расчетным (см. рис. 6) должно снизиться приблизительно до (2,5±0,3) см³/100 г, без привлечения данных о напряженном состоянии трудно объяснить экспериментальные данные о вероятности возникновения холодных трещин, представленные в табл. 2.

На рис. 7-9 приведены расчетные данные об остаточных главных максимальных напряжениях σ_1 и поперечных нормальных напряжениях о, 10, 0тветственных за возникновение и распространение холодных трещин, типа приведенных на рис. 4 для вариантов, указанных в табл. 2.

Обработка этих данных по (1) для ЗТВ при $V_{\rm M} > 0,5$ (на рис. 7–9 эту зону ограничивает кривая 3) позволила установить зависимость параметров

A, B и η (1) от содержания водорода в присадочном материале $H_{прис}$ (рис. 10). Характерно, что значение $A(H_{прис})$ достаточно хорошо коррелирует со значением $\sigma_{\rm kp}$ (H_{прис}), полученным при испытаниях «Имплант» при скорости охлаждения, соответствующей содержанию мартенсита свыше 50 % ($V_{\rm M} > 0,5$).

Таким образом, из изложенного можно заключить, что количественные характеристики необходимых условий образования холодных трещин при сварке низколегированных высокопрочных сталей проявляются достаточно четко при использовании вероятностной модели хрупкого разрушения Вейбулла. Параметры распределения

15		4.6.5										, MA			5.	6	0.0		10		25	-	2.5					-				10
0.05	0 0,5	1 1,5	2 2	2,5	3 3,5	4	4,5	5 5	0 0	6,5	7 7	0 0		- 1	1000	0	0.5	1	1,5	2	2.5	3	3,5	4	4,5	0	0,0	0	0,0	1 1	.5	-
0.25	309 357	339 318	9 296	272 24	7 222	193	161	124	0 0	0	0	0 0		- 1	0.25	361	350	334	314	293	270 2	45	219 1	190	158 1	119	0	0	0	0	0	0
0.75	389 357	339 318	9 296	272 24	1 222	193	161	124	0 0	0	0	0 0		- 4	0.75	361	350	334	314	293	270 .	40	219	190	158 1	119	0	0	0	0	0	
1.25	371 358	339 318	5 294	271 24	5 220	194	163	126	0 0	0	0	0 0		- 1	1.25	363	351	334	313	291	268 2	44 ;	218 1	191	159 1	121	0	0	0	0	0	0
1.75	376 360	339 316	5 291	267 24	3 219	194	165	130	0 0	0	0	0 0		- 1	1.75	368	353	334	312	288	265 2	41 3	216 1	191	161 1	125	0	0	0	0	0	9
2.25	394 363	338 313	3 287	262 23	9 216	194	168	136	0 0	0	0	0 0		- 4	2.25	375	356	333	309	284	260 2	36 2	213 1	190	165 1	132	0	0	0	0	0	0
2.75	393 367	988 308	9 281	255 23	21312	192	173	147	0 0	0	0	0 0		- 1	2.75	396,	360	332	306	279	252 2	30	208 1	188	168 1	145	0	0	0	0	0	Ç
3.25	404 373	339 308	274	247 22	3 204	189	177	163	0 0	0	0	0 0		- 1	3.25	399	385	332	301	271	244 3	21 3	201 1	185	174 1	160	0	0	0	0	0	0
3.75	420 378	339 301	1 267	237 21	2-493	183	183	186	0 0	0	0	0 0		- 1	3.75	414	371	333	297-	264	234 2	109	190 1	179	178 1	184	0	0	0	0	0	0
4.25	436 387	340 298	3 260	226 19	9 178	179.	183	222	0 0	0	0	0 0		- 1	4.25	431	378	333	293	256	224	96-3	176	167	179 2	220	0	0	0	0	0	0
4.75	455 395	341 294	4 252	217 18	6 163	150	159	286	0 0	9	0	0 0		- 1	4.75	451	386	334	289	250	215	85 1	160 1	147	154-2	284	Ye_	0	0	0	0	0
5.25	475 404	342 291	1 247	209 17	9 156	146	165	201 3	2 53	0)	0	0 0			5.25	471	394	334	286	244	207 1	79 1	155 1	142	162 1	195/	30	55	2	0	0	¢
5.75	496 410	342 287	241	203 17	4 153	147	146	159 6	2 24	155	0	0 0		- 1	5.75	492	400	334	281	237	202	74 1	154 1	145	148	150	56	13	66)	0	0	0
6.25	513 416	340 281	233	196 17	0 149	146	134	147 6	2/14	97/	- 17	76 0		- 1	6.25	511	406	331	274	230	193	72 1	154	144	142 1	127	59	28	.72	05 -1	18	0
6.75	528 415	335 273	3 223	184 16	6 142	146	122	149 5	8 -12	224	77 -	25 -14		1	6.75	529	406	324	266	218	183	68	151 1	131	135	97	33	-214	78 1	39 -	50 -:	20
7.25	536 406	323 261	212	169 16	1 127	153	-80	169 -	5 271	176	70	-5 -32		1.1	7.25	540	401	314	254	203	106	64	147 1	111	127	55 -	-16	301 2	227 1	18 -	11 -	42
7.75	536 388	306 247	7 198	143 16	2-05	187	30	233 22	9 221	148	62	-2 -40			7.75	544	385	298	242	189	135 1	62 1	152	69	148	-8-1	699 :	259 1	192 1	02	1 -	45
8.25	522 359	281 233	3 185	92 18	5 32	239	255	285 21	0 183	125	56	-1 -42		11	8.25	539	353	274	229	181	82 1	81 1	182/	-8	231 2	231 2	260 3	222 1	163	88	8 -	42
8.75	493 309	247 217	7 182	3 23	2 257	299	257	256200	0 162	110	52	2 -36		1.1	8.75	503	309	246	215	185	18/	47	165 2	227.	277 2	224 2	226	191 1	139	77	12 -	34
9.25	425 247	221 190	154	232 29	3 268	282	254	236 19	1 150	102	52	7 -29	1.1	+ 1	9.25	428	247	221	188	152	233 2	67 :	252 2	23/2	253 2	219 2	203	169 1	123	70	17 .	28
9.75	250 255	264 250	255	254 28	3 274	271	248	222 18	3 142	98	53	12 -21	11.	мм	9.75	249	254	261	245	251	245 2	71 :	164 3	247	242 2	14 1	190	156 1	113	67	21 -	18
N X 1	0 0.5	1 1.5	289	2.5 3	3 3.5 5 220	4	4,5 159 1	5 5.5	6	6.5 0	77	0 0																				
0.25	335 332	323 307			e					-		0 0																				
0.25 0.75	335 332 335 332	323 307 323 307	289	268 245	220	192	159 1	17 0	0	0	•																					
0.25 0.75 1.25	335 332 335 332 338 334	323 307 323 307 323 306	289	68 245 65 243	3 219	192 193	159 1 161 1	17 0	0	0	0	0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75	335 332 335 332 338 334 345 337	323 307 323 307 323 306 322 303	289 286 282	868 245 865 243 861 236	3 219 9 217	192 193 192	159 1 161 1 164 1	17 0 19 0 26 0	0	000	0	0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299	289 286 282 277	268 245 265 243 261 236 254 233	3 219 9 217 3 212	192 193 192 191	159 1 161 1 164 1 168 1	17 0 19 0 26 0 36 0	00000	000	000	0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 370 345	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294	289 286 282 277 277 270	268 245 265 243 261 236 254 233 264 233	219 217 217 212 212 205	192 193 192 191 189	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0	00000	0000	0000	0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289	289 286 282 277 270 270 270	268 245 265 243 261 235 254 233 266 234 266 235 236 213	219 217 217 212 205 212 205	192 193 192 191 189 184	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1 178 1	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0	00000	00000	00000	0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25 3.25 3.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 348 289 346 284	289 286 282 277 277 270 262 262	268 245 265 243 261 236 254 233 266 234 266 234 266 234 236 213 25 200	219 217 217 212 212 205 212 205 212 205 212 205 219 219 219 217 219 219 217 219 217 219 217 219 219 219 219 219 219 219 219 219 219	192 193 192 191 189 184 177	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1 173 1 178 1 183 2	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0 02 0	0000000	000000	000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25 3.75 4.25	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 370 345 387 351 407 357 429 363	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 346 284 316 278	289 286 282 277 270 270 262 253 245	268 245 265 243 261 236 254 233 266 234 236 213 236 213 225 200 214 187	220 219 217 212 212 212 205 212 205 212 205 219 219 219 219 217 3 219 217 3 219 217 3 219 217 3 219 217 3 219 217 3 219 7 217 3 219 7 217 3 219 7 217 3 219 7 217 3 219 7 217 7 3 212 1 9 7 19 7 19 7 19 7 19 7 19 7 19 7 19	192 193 192 191 189 184 177 163	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1 178 1 183 <u>2</u> 182 2	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0 02 0 43 0	00000000	4000000	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 3.25 3.25 3.75 4.25 4.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357 429 363 450 371	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 348 289 346 284 316 278 316 278 317 273	289 286 282 277 270 262 253 245 245 238	268 245 265 243 265 243 261 236 254 233 256 224 236 213 255 200 214 187 205 176	220 3 219 3 212 4 205 3 212 4 205 3 195 3 195 3 195 3 167 5 151	192 193 192 191 189 184 177 163 140	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1 173 1 178 1 183 <u>2</u> 182 2 154 3	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0 02 0 43 0 13 0		000000000000000000000000000000000000000	00000000	000000000000000000000000000000000000000																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25 3.75 4.25 4.75 5.25	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357 429 363 450 371 471 377	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 348 289 346 284 316 278 316 278 317 273 318 271	289 286 282 277 270 252 253 245 245 238 232	168 245 165 243 165 243 165 243 165 243 165 243 165 243 165 243 165 243 165 243 165 234 165 234 125 200 114 187 105 176 198 171	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 3 195 195 195 195 195 195 195 195 195 195	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 173 1 183 2 183 2 182 2 154 3 161 2	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 74 0 02 0 43 0 13 0 09 35	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000																				
0.25 0.75 1.25 2.25 2.75 3.25 3.75 4.25 4.75 5.25 5.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357 429 363 450 371 471 377 492 382	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 346 284 316 278 316 278 317 273 318 271 316 268	289 286 282 277, 270, 262 253 245 238 238 232 232 229	268 245 265 243 254 233 254 233 254 233 255 230 214 187 205 176 198 171 193 165	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 9 184 7 167 5 151 1 146 9 148	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 183 2 183 2 182 2 154 3 161 2 141 1	17 0 19 0 26 0 52 0 74 0 02 0 13 0 09 35 53 67	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000																				
0.25 0.75 1.25 2.75 3.25 3.75 4.25 4.75 5.25 5.75 6.25	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 370 345 387 351 407 357 429 363 450 371 471 377 492 382 511 385	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 346 284 316 278 317 273 318 271 318 271 316 268 312 263	289 286 282 277, 270, 262 245 245 245 238 232 232 229 220	268 245 265 243 261 236 254 233 264 233 265 234 236 213 225 200 214 187 205 176 198 171 193 165 195 165	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 9 184 7 167 5 151 1 146 9 148 5 148	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 183 2 183 2 182 2 184 3 161 2 141 1 128 1	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 74 0 02 0 43 0 13 0 09 35 53 67 22 87	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	00000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.25 1.25 1.25 2.25 3.25 3.75 4.25 5.25 5.75 6.25 6.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357 429 363 450 371 471 377 492 382 611 385 527 385	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 316 284 316 284 317 273 318 271 316 268 312 263 305 249	289 286 282 277, 270, 262 245 245 238 232 238 232 229 220 218	268 245 265 243 265 243 265 233 254 233 246 234 225 200 214 187 205 176 198 171 193 165 195 165 188 164	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 5 151 1 146 5 151 1 146 5 148 5 148 5 148 5 148	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 173 1 178 1 183 2 182 2 182 2 182 2 182 2 182 3 161 2 161 2 141 1 128 1 110	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0 002 0 43 0 13 0 09 35 53 67 22 87 86 84	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.25 1.25 1.25 2.25 2.25 3.25 3.25 3.75 4.25 5.25 5.75 6.25 6.75 7.25	335 332 335 332 338 334 345 337 56 340 376 345 376 345 377 357 429 363 450 371 471 377 492 382 511 385 527 385 527 385	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 346 284 316 273 318 271 316 268 317 273 318 271 316 268 312 263 305 249 292 234	289 286 282 277 276 277 262 253 245 238 232 232 229 220 218 206	268 245 265 243 261 236 254 233 265 236 213 225 200 214 187 205 170 198 171 193 165 195 165 188 164 185 163	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 0 184 7 167 5 151 1 146 9 148 5 148 5 148 4 145 3 138	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134 134	159 1 161 1 164 1 168 <u>1</u> 173 1 178 1 178 1 183 <u>2</u> 182 <u>2</u> 154 3 161 <u>2</u> 141 1 128 1 110 94	17 0 19 0 26 0 36 0 52 0 74 0 002 0 43 0 113 0 009 35 53 67 22 87 86 84 56 125	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 2.75 3.25 3.75 4.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5.2	335 332 338 332 338 334 345 337 345 337 366 340 370 345 387 357 407 357 429 363 440 357 440 357 440 357 440 357 440 357 440 357 540 368 546 368	323 307 323 307 323 306 322 303 321 299 319 294 548 289 346 284 316 278 317 273 318 271 316 268 312 263 305 249 273 209	289 286 282 277 276 277 262 253 245 238 232 232 232 229 220 218 206 193	268 245 265 243 261 236 254 233 255 200 214 187 205 170 198 171 193 165 195 165 188 164 185 163 186 160	220 3 219 9 217 3 212 4 205 3 195 0 184 7 167 5 151 1 146 0 148 5 147 5 147 5 148 5	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134 134 136	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 178 1 178 1 183 2 182 2 154 3 161 2 161 2 161 2 161 1 10 94 67	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 52 0 52 0 74 0 002 0 43 0 13 0 09 35 53 67 22 87 86 84 56 125 35/222	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25 5.75 6.25 6.75 6.25 6.75 6.25 6.75 8.25 8.25	335 332 335 332 338 334 345 337 365 340 565 340 556 340 556 340 387 357 407 357 429 363 450 371 492 382 511 385 527 385 540 379 546 368 546 368 549 352	323 307 323 307 323 306 322 306 319 294 319 294 316 284 316 284 316 278 317 273 318 271 316 268 312 263 305 249 292 234 273 209 273 209	289 286 282 277 270 270 262 277 262 277 245 238 232 229 220 218 206 193 183	268 245 265 243 265 243 264 233 254 233 246 224 236 213 225 200 214 187 205 176 198 171 193 165 186 164 185 163 186 164 185 163	220 219 217 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 212 205 215 212 205 215 212 205 215 212 215 212 215 215 215 21	192 193 192 191 184 177 163 140 137 139 138 134 134 136 151	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 178 1 182 2 182 2 182 2 182 2 182 2 182 2 184 3 161 2 184 3 161 2 161 1 183 2 182 2 161 1 183 2 182 2 161 1 183 2 182 2 161 1 183 2 182 2 161 1 183 2 164 3 164 3 16	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 52 0 52 0 74 0 002 0 43 0 13 0 09 35 53 67 22 87 86 84 56 125 35 220 17 280	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 2.75 3.25 2.75 3.25 5.25 5.75 6.25 6.75 5.25 5.75 6.25 6.75 7.25 8.25 8.75	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 351 407 357 407 357 407 357 407 357 417 377 492 382 511 385 527 385 540 379 546 368 539 352 515 328	323 307 323 307 323 307 322 306 322 306 319 294 548 289 316 284 316 284 317 273 318 271 316 268 317 273 305 249 292 234 273 209 292 234 273 209 292 234 102	289 286 282 277 270 252 245 238 232 232 232 232 232 232 232 232 233 232 233 232 233 232 233 233 233 233 233 233 233 233 233 233 233 233 235 235	268 245 265 243 265 243 265 233 255 236 214 187 205 200 214 187 198 171 193 165 195 165 188 164 185 165 186 160 196 161 196 161 221 177	220 3 219 3 217 3 212 4 205 3 195 3 19	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134 134 134 136 151 230	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 178 1 182 2 182 2 183 2 184 3 182 2 184 3 182 2 184 3 182 2 184 3 185 3 187 3 18	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 52 0 52 0 52 0 13 0 09 35 53 67 22 80 86 84 56 125 35 220 17 280 86 253	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0																				
0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 3.75 5.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5.25 5	335 332 335 332 338 334 345 337 345 337 345 337 345 347 370 345 387 351 407 357 4429 363 450 371 471 377 492 382 511 385 527 385 540 379 546 368 539 352 515 328	323 307 323 307 323 307 322 303 322 303 321 299 346 289 346 287 316 278 316 278 316 278 316 278 317 273 318 271 316 268 312 263 305 249 292 234 273 209 252 166 228 102 214 42	289 286 282 277 262 253 245 238 238 238 232 229 220 218 200 183 189 260	268 245 265 243 261 236 254 236 236 213 225 200 214 187 205 176 198 171 193 166 1965 165 188 164 185 163 186 163 196 171 193 165 195 165 188 164 185 163 196 161 197 152	220 3 219 3 217 3 212 4 205 3 195 3 19	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134 134 134 134 136 151 230 276	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 183 2 182 2 182 2 182 2 182 2 182 3 161 2 141 1 128 1 110 94 67 -6 3 240 2 239 2	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 52 0 52 0 53 67 22 87 86 84 56 125 56 125 56 228 17 280 86 253 54 226	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	D			D			T									T	50			
0.25 0.75 1.25 2.25 2.25 3.75 4.25 5.75 5.75 5.75 5.75 5.75 5.75 5.75 5	335 332 335 332 338 334 345 337 356 340 376 345 387 357 429 363 387 357 429 363 387 357 429 363 370 357 429 363 371 385 527 385 540 368 539 352 546 368 539 352 515 328 455 279 341 184	323 307 323 307 323 307 322 303 322 303 321 299 319 294 548 289 316 278 316 278 316 278 317 273 318 271 316 263 312 263 312 263 312 263 312 263 312 263 312 263 212 263 212 264 212 264 213 209 252 166 228 102 214 42 115 246	289 286 282 277 270 262 253 245 238 232 229 220 218 209 218 209 218 183 189 260 269	268 245 265 243 261 236 254 236 236 213 225 200 214 187 205 176 198 171 193 166 195 165 188 164 185 163 186 160 196 177 197 152 243 238	220 3 219 3 212 4 205 3 122 4 205 3 184 7 167 5 151 6 148 5 14	192 193 192 191 189 184 177 163 140 137 139 138 134 134 134 136 151 230 276 258	159 1 161 1 164 1 168 1 173 1 173 1 178 1 170 1 1	17 0 19 0 26 0 52 0 52 0 52 0 52 0 53 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	000000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	P	чс.	8.	Вли	1911	ие	T_0	на	наг	ря	жен	ния	σ _ν	, nț	ри .	<i>L</i> =	50	ММ	: а	

A DURANTINA MARKA

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

11	0	0,5	1	1,5		2.5	5	33	,5	4 -	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8		R	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	- 4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
0.25	256	270	278	281	281	279	27	7 27	3 2	67 2	56	236	0	0	0	0	0	0		0.25	134	167	194	216	234	251	267	282	294	300	299	0	0	0	0
.75	256	270	278	281	281	278	27	7 27	3 2	67 2	:56	236	0	0	0	0	0	0		0.75	134	167	194	216	234	251	267	282	294	300	299	0	0	0	0
1.25	259	272	278	279	278	277	27	4 27	2 2	68 2	57	239	0	0	0	0	0	0		1.25	137	169	194	214	232	249	265	281	294	302	301	0	0	0	0
1.75	265	275	278	277	274	272	2 27	1 26	9 2	67 2	60	245	0	0	0	0	0	0		1.75	142	172	194	212	228	244	261	278	294	305	307	0	0	0	0
2.25	\$75	280	277	272	269	265	5 26	4 28	5 2	67 2	65	254	0	0	0	0	0	0		2.25	152	176	193	208	222	237	255	274	293	309	316	0	0	0	0
2.75	288	285	277	268	261	256	\$ 25	5 25	9 2	65 2	71	268	0	0	0	0	0	0		2.75	164	182	194	204	215	228	246	267	292	316	330	0	0	0	0
3.25	303	292	297	263	253	24	5 24	4 24	9 2	61.2	79	289	0	0	0	0	0	0		3.25	180	190	195	199	206	216	233	256	287	324	352	0	0	0	0
3.75	323	301	278	257	24	23	22	8 23	4 2	53 2	86	321	0	0	0	0	0	0		3.75	200	199	195	193	196	202	216	240	278	331	386	0	0	0	85
4.25	346	311	279	252	232	218	3 21	0 21	3 2	35 2	86	371	0	-0	_0	97	30	0		4.25	224	211	198	188	185	187	196	217	258	332	442	0	0	V	0
4.75	372	324	283	246	222	204	19	4 15	2 2	04 2	47	466	0	0	0	0	0	0		4.75	252	225	202	183	175	173	178	191	221	286	552	0	0	9	0
5.25	400	335	285	243	214	196	3 18	6 18	14 1	98 2	253	314	62	84	0	0	0	0		5.25	283	239	206	181	167	163	169	183	213	289	368	75	102	0	0
5.75	429	344	285	238	207	187	18	3 18	3 1	97 2	25	238	109	55	73	0	0	0		5.75	315	252	207	177	161	155	165	180	209	251	273	127	70	96	0
8.25	455	350	280	232	198	170	3 18	1 18	0 1	85 2	12	200	112	36	210	39	-94	0	- 12	6.25	346	260	205	172	152	144	163	175	192	230	224	130	520	223	47
6.75	475	349	271	223	183	159	18	0 17	8 1	64 2	800	148	58	\$15	190	21	-56	-26	- 13	6.75	371	262	199	164	139	126	160	171	167	217	166	74	321	201	34
7.25	483	338	258	209	169	133	18	6 18	6 1	23 2	14	77	340	275	179	29	-35	-51	- 10	7.25	384	255	189	152	125	101	166	176	122	220	90	344	283	188	43
7.75	474	314	239	199	164	85	5 21	4 21	5	44/2	88	278	294	246	177	30	-31	-58	10	7.75	380	235	172	145	122	51	193	204	38	/289	279	298	251	185	44
8.25	443	272	213	197	177	-	1/29	3 20	0 2	47 3	17	263	258	222	177	21	-29	-59	•	8.25	355	196	149	145	138	-37	270	188	234	310	261	260	227	183	37 .
8.75	379	204	192	177	149	225	5 29	0 27	2 2	58 2	285	252	236	207	175	14	-30	-52 1/	, MN	18.75	300	133	130	126	114	187	262	251	245	276	248	236	210	179	29

Рис. 9. Влияние значения L на напряжения σ_{yy} при $T_0 = 11$ °C: $a - L = 70; \delta - 100$ мм



Рис. 10. Влияние содержания диффузионного водорода в присадочном металле на параметры Вейбулла A и B при $\eta = 4$

являются в общем виде функцией содержания диффузионного водорода и микроструктурного состояния материала при образовании разрушения.

При сварке плавлением стали 14ХГ2САФД можно принимать параметры распределения Вейбулла $\eta = 4$, $A(H_{прис}) \approx \sigma_{\kappa p}(H_{прис})$ (рис. 10), $\overline{B}_j \approx 100$ МПа·мм^{3/4} при содержании мартенсита в 3TB более 50 % ($V_M = 0.5$). При меньших значениях V_M заметно возрастает величина $A(H_{прис})$ так же, как и $\sigma_{\kappa p}(H_{приc})$ при испытаниях «Имплант», при этом вероятность образования холодных трещин в этой стали резко снижается.

- 1. *Welding* handbook: Materials and applications. Miami, USA, 1998. V. 4, pt. 2. 620 p.
- 2. Махненко В. В., Королева Т. В., Лавринец И. Г. Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 7–13.
- Теплофизические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справ. / Под ред. Б. Е. Неймарка. — М.: Энергия, 1967. — 219 с.

Mathematical model of the risk of cold cracking in welding of structural high-strength steels is considered. The model is based on distributed data on the state of microstructure, content of diffusible hydrogen and stressed state in elementary volumes within the welded joint zone. It is shown that the model makes it possible to more precisely evaluate the local conditions of cold cracking on the basis of the above parameters.

TTO ROCCOTTENT ROCCOST

Поступила в редакцию 02.09.2009