

Винахід відноситься до металургії, зокрема до області лито-зварних конструкцій із сталі підвищеної міцності.

Відомо про сталь марки 15ХН2МФ (ДСТ 7832-65, сталь 15ХН2МФ), що містить у мас. %: вуглець 0,12-0,18; кремній 0,2 - 0,4; марганець 0,5 - 0,8; хром 1,2 - 1,4; нікель 1,6 - 2,0; молібден 0,2 - 0,3; ванадій 0,1 - 0,2; мідь \leq 0,3, залізо інше. Зазначена сталь після нормалізації з відпуском має наступні механічні властивості: $\sigma_{0,2}$ = 650 МПа, σ_b = 750 МПа, δ = 12%, ψ = 20%, КСЧ = 30 Дж/см². Володіючи добрими показниками міцності, така сталь має відносно низькі показники ударної в'язкості і відноситься до класу труднозварюваних сталей. При її зварюванні необхідно застосовувати попередній підігрів для попередження утворення холодних тріщин.

Відома також сталь 12ДХН1МФЛ (ДСТ 977-75, сталь 12ДХН1МФЛ), що містить мас. %: вуглець 0,1-0,18; кремній 0,2-0,4; марганець 0,3-0,55; хром 1,2-1,7; нікель 1,4-1,8; молібден 0,2-0,3; мідь 0,4-0,65; ванадій 0,08-0,15, залізо - решта. Зазначена сталь застосовується для виготовлення литих-зварних конструкцій і після нормалізації з відпуском має наступні механічні властивості: $\sigma_{0,2}$ = 650 МПа, σ_b = 800 МПа, δ = 12%, ψ = 20%, КСЧ = 30 Дж/см². За близькими показниками механічних властивостей ця сталь у порівнянні з попередньою сталлю, містить трохи менше марганцю і, крім того, додатково легується міддю. Легування міддю трохи підвищує корозійну стійкість сталі і незначно міцність за рахунок процесів дисперсійного твердіння під час відпуску. Однак з погляду на дорожнечу міді такого ж ефекту можна домогтися легуванням більш дешевими елементами. Дана сталь прийнята як прототип. Зазначені високоміцні сталі через підвищене легування нікелем є порівняно дорогими і мають низьку стійкість проти утворення холодних і гарячих тріщин при зварюванні.

Поставлено задачу створити низьколеговану високоміцну сталь для лито-зварних конструкцій зі зниженням вмісту нікелю, у якій завдяки оптимальному складу досягаються високі показники міцності зі збереженням задовільних показників в'язкості і зварюваності.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в сталі, яка містить легуючі елементи нікель, хром, марганець, молібден, ванадій відповідно до винаходу збільшено вміст марганцю, додано цирконій, а кількість вуглецю обмежено при наступному оптимальному співвідношенні компонентів, мас. %:

вуглець	0,10-0,14;
кремній	0,20-0,30;
марганець	1,3-1,6;
нікель	0,8-1,0;
хром	0,5-0,7;
молібден	0,3-0,4;
ванадій	0,10-0,15;
цирконій	0,10-0,15;
алюміній	до 0,07;
сірки і фосфору (кожного)	до 0,030;
залізо	решта.

Для дослідження впливу легуючих добавок на міцність і в'язко-пластичні характеристики сталі шляхом математичної обробки з залученням ЕОМ були оброблені дані по 28 сталям (Dickinson D.W., Ries G.D. Implant Testing of Medium to High Strength Steel-A Model for Predicting Delayed Cracking Susceptibility. //Welding Journal. 1979. №7. P.205-211) із вмістом вуглецю і легуючих елементів, що змінюються в наступних межах, мас. %: вуглець 0,05-0,18; кремній 0,17-0,95; марганець 0,5-4,6; хром від 0 до 3,1; нікель від 0 до 1,95; молібден від 0 до 0,5; ванадій від 0 до 0,22; ніобій від 0 до 0,11; алюміній від 0 до 0,05 мідь від 0 до 0,75. Схильність до утворення холодних тріщин при зварюванні оцінювалася іспитами за методом ом вставок («імплант») (Granjon H. The "implants" method for Studing the Weldabiliten of hinhg Steugth Steels. Metal Constr. and British Weldig Journal. 1969. 11. p. 509-511). Приварка зразків-вставок здійснювалася аргоно-дуговим зварюванням з додаванням 2% кисню, що забезпечувало мінімальну концентрацію дифузійного водню в наплавленому металі. Швидкість охолодження металу після зварювання була така, що при заданому легуванні сталей в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань утворювалась повністю мартенситна структура. Як показник схильності до холодних тріщин при зварюванні зазначених сталей приймали критичні напруження уповільненого руйнування $\sigma_{кр}$, тобто максимальні напруги при яких не спостерігається відрив зразків вставок протягом 24 годин. Отримано наступне рівняння множинної лінійної регресії:

$$\sigma_{кр} = 556 - 25C - 164Si - 44Mn - 38Cr + 87Ni - 198Mo - 456V + 1500Al + 845Nb - 118Cu, (\text{МПа}).$$

Комплексне легування С, Мп, Сг, Мі, Мо, V і Zr і його вплив на механічні властивості і зварюваність сталей досліджено в роботі (Лебедев Ю.М., Репин В.А., Цимбалистий А.Г. Разработка составов низколегированной стали для литых сварных конструкций// Известия Вузов. Черная металлургия. 1988. №3. С.87-91). При цьому встановлено, що всі легуючі елементи, в тому числі і вуглець, зміцнюють сталь і знижують її пластичність. За ступенем зміцнення їх можна розташувати в наступній послідовності: С, V, Zr, Мо, Сг, Ni, Мп. На величину критичних напружень зварних зразків-вставок, зварених електродами з основним покриттям, негативно впливають С, Сг, V. Марганець дещо підвищує $\sigma_{кр}$, більш помітно підвищують Ni і Мо, а Zr особливо сильно. Крім того, при виборі легуючих добавок і їхньої кількості враховані наступні положення. Вуглець обмежується за вмістом виходячи із його негативного впливу на зварювальні властивості і регламентується з його впливом на міцність. Кремній використовується як розкислювач і його вміст обумовлюється в звичайних межах для зварюваних сталей. Марганець позитивний елемент, так як він: порівняно дешевий, сильно підвищує схильність до гартування, зменшує схильність сталі до утворення гарячих тріщин, сильний десульфуратор, що обумовлено зв'язуванням шкідливого елемента - сірки, а також добрий розкислювач. Нікель - елемент, що підвищує в'язко-пластичні властивості сталі, але і підвищує схильність сталі до утворення гарячих тріщин при зварюванні. Хром підвищує міцнісні властивості і трохи зменшує схильність сталі до утворення гарячих тріщин. Молібден - елемент, вміст якого доводиться обмежувати виходячи із його дорожнечі і дефіцитності, хоча він у кількості до 1%

підвищує практично всі показники механічних властивостей. Мікродобавки ванадію, цирконію й алюмінію впливають на властивості низьколегованих сталей екстремально. Їхній вплив специфічний і тому їх обмежують за вмістом. Ванадій подрібнює зерно при термообробці сталей, підвищує їхню міцність і твердість, але знижує в'язко-пластичні властивості. Цирконій підвищує міцність і всі зварювальні характеристики сталі. Алюміній сильний розкислювач і при мікрولةгуванні підвищує міцність, в'язкість і пластичність. Мікродобавки бору перешкоджають виділенню структурно вільного фериту по границям зерен у процесі прискореного охолодження низьколегованої сталі з аустенітною структурою і тому підвищує її схильність до гартування. Сірка і фосфор утворюють сульфід і фосфіди, що розташовуються по границях зерен, знеміцнюють структуру сталі під час кристалізації і підвищують її схильність до утворення гарячих тріщин. Тому їхній вміст при виплавленні сталі необхідно обмежувати.

З метою подальшої оптимізації хімічного складу сталі за основними легуючими (Мі, Сг, Мп, Мо) і вивчення впливу мікродобавок Zr, V, В, Аl була відлита партія дослідних сталей з порівняно високим вмістом нікелю, хімічний склад яких наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних сталей, %

№ п/п	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V (ОСТ.)	Al (ОСТ.)	В (розр.)	РЗМ (розр.)	Zr (розр.)
1	0,07	0,17	0,60	0,40	1,40	0,30	0,10	0,06	-	-	0,13
2	0,12	0,27	0,70	0,50	1,50	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
3	0,14	0,40	0,80	0,60	1,60	0,40	0,18	0,06	-	-	0,13
4	0,10	0,27	0,70	0,50	1,50	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
5	0,18	0,30	0,70	0,50	1,50	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
6	0,25	0,30	0,70	0,50	1,60	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
7	0,12	0,30	0,70	1,00	1,00	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
8	0,12	0,30	0,80	0,08	1,50	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
9	0,12	0,30	1,30	0,40	1,50	0,35	0,14	0,06	-	-	0,13
10	0,15	0,24	0,75	-	1,78	0,29	0,035	0,09	-	-	0,13
11	0,13	0,33	0,77	0,21	1,41	0,26	0,056	0,09	0,004	-	0,13
12	0,15	0,36	0,85	0,30	1,51	0,27	0,05	0,11	0,008	-	0,13
13	0,14	0,34	0,75	0,26	1,37	0,27	0,05	0,10	0,004	0,2	0,13
14	0,15	0,27	0,85	0,24	1,49	0,27	0,05	0,11	-	-	0,13

Механічні властивості сталей після термообробки й випробувань на зварюваність за методом вставок наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Механічні властивості дослідних сталей
після термообробки і випробувань на зварюваність

№п/п	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	HV	$\sigma_{кр}$, МПа	HV _{max} , ЗТВ
1	450	407	8	35,8	188	173	650	266
2	703	655	8	26,5	100	239	615	354
3	565	530	8	21,3	40	259	450	342
4	565	525	8	21,3	57,5	235	670	363
5	743	690	8	16	46,5	266	482	405
6	693	610	8	16,8	34,5	267	450	405
7	543	510	10	15,5	40,5	243	750	390
8	690	640	8	17	32,7	229	615	354
9	700	656	10	21,5	46	267	323	405
10	670	503	23	64,3	186	184	800	254
11	780	630	21	59	62,5	231	650	333
12	858	685	18	47,8	47,5	255	684	354
13	805	663	19	60,2	61,7	250	742	360
14	815	660	20	60	129	238	705	354

Остаточний вигляд емпіричних формул, отриманих при обробці результатів досліджень механічних властивостей і зварюваності наступний:

$\sigma_b = 473 + 1334C + 146Mn - 52Si - 233Cr - 169Ni - 826Mo + 1933V + 4275Al + 8964B$, МПа, середньоквадратичне відхилення ± 46 МПа;

$\sigma_{0,2} = 462 + 1115C + 147Mn - 218Si - 236Cr - 210Ni - 826Mo + 2849V + 3823Al + 8773B$, МПа, середньоквадратичне відхилення ± 46 МПа;

($= 17 - 14C + 2Mn + 64Si + 4Cr + 4Ni - 6Mo - 198V - 94Al - 1030B$, %, середньоквадратичне відхилення $\pm 0,1\%$;

$\psi = 52-106C-7Mn+132Si+18Cr+37Ni-194Mo-336V+38Al-3181B$, %, середньоквадратичне відхилення $\pm 2,6\%$;
 $KCU = 99-504C-42Mn-349Si+101Cr+182Ni-89Mo-846V+57Al-7688B$, Дж/см²; середньоквадратичне відхилення $\pm 14,4$ Дж/см²;
 $HV_{max} = 122+327C+55Mn+110Si+10Cr-19Ni-422Mo-882V+811Al-1118B$; середньоквадратичне відхилення $\pm 8HV$;
Зварені зразки-вставки:

$\sigma_{KP} = 502-720C-678Si-439Mn-197Cr-470Ni+4351Mo-2874V+4793Al+8247B$, (МПа),

середньоквадратичне відхилення ± 28 МПа;

$HV_{max} = 353+641C+100Mn-40Cr-16Ni-1418Mo+2456V+1524Al+2196B$,

середньоквадратичне відхилення $\pm 28HV$.

Отримані залежності властивостей сталей від хімічного складу дозволяють якісно визначити вплив досліджуваних елементів:

1. С, Mn, V, Al, B підвищують міцності характеристики сталей, але зменшують в'язко-пластичні;
2. Si, Cr у межах досліджуваного вмісту позитивно впливають на показники пластичних властивостей, але трохи знижують міцність, а Si також і ударну в'язкість.
3. Додавання Zr у кількості близько 0,13%, при зазначених вище співвідношеннях основних легуючих елементів, дозволило підвищити в'язко-пластичні властивості сталі і зменшити її схильність до уповільненого руйнування в зоні термічного впливу після зварювання. При цьому значення критичних напружень уповільненого руйнування підвищують тільки Mo, Al, B.

4. Знижена пластичність і в'язкість сталей 2, 3, 4, 5 і 6 (табл.1) обумовлена тим, що в їх структурі після виливання утворюються дефекти типу мікротріщин і раковин. Це вказує на те, що для одержання щільних відливок варто обмежити легування ливарної сталі нікелем, а збільшити вміст у ній марганцю.

У результаті проведених досліджень і аналізу всіх отриманих залежностей вибрали склад сталі умовно позначеної, як 12ХГ2НМФЦЛ із наступним складом, мас. %:

вуглець	0,10-0,14;
кремній	0,2-0,3;
марганець	1,5-1,7;
нікель	0,8-1,0;
хром	0,5-0,7;
молібден	0,3-0,4;
ванадій	0,10-0,15;
цирконій	0,15;
алюміній	до 0,07;
сірки і фосфору (кожного)	до 0,03;
залізо	решта.

Як приклад наведено результати плавки запропонованого складу сталі 12ХГ2НМФЦЛ (табл.3 - хімічний склад плавки; табл.4 - механічні властивості сталей після нормалізації 900°C і відпуску 650°C).

Таблица 3

Хімічний склад плавки запропонованої сталі, %

Індекс плавки	C	Si	Mn	Cr	Mi	Mo	V розр.	Zr розр.	Al ост.	S	P
1	0,14	0,3	1,7	0,7	1,0	0,4	0,13	0,13	0,07	0,02	0,02
2	0,10	0,2	1,5	0,5	0,8	0,3	0,13	0,13	0,03	0,02	0,02
3	0,135	0,26	1,45	0,63	0,92	0,32	0,13	0,15	0,068	0,02	0,02

Таблица 4

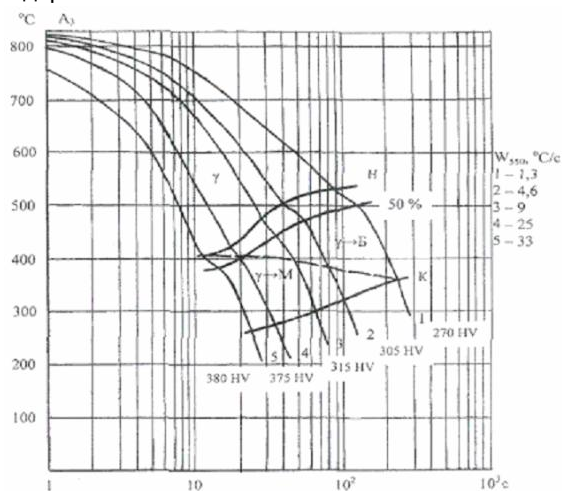
Механічні властивості досліджених сталей після нормалізації 900°C и високого відпуску 650°C

Індекс Плавки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
1	966	764	12,6	42	51
2	752	653	17	52	102
3	944	742	14,7	45	56

Дослідження структурних перетворень сталі 1 (табл.3) виконано за методикою (Лебедев Ю.М., Кравченко Л.П., Данилюк Н.М. Методика моделирования сварочных термометформационных циклов // Автоматическая сварка. 1978. №12) шляхом побудови зварювальної діаграми термокінетичного перетворення аустеніту для високотемпературних ділянок ЗТВ, що наведена на рисунку (Діаграма термокінетичного перетворення аустеніту зони термічного впливу для сталі 12ХГ2НМФЦЛ $T_H=1250^\circ\text{C}$. Склад сталі мас. %: C=0,135; Si=0,26; Mn=1,45; Cr=0,63; Ni=0,92; Mo=0,32; V=0,13; Zr=0,15; S і P кожного по 0,02).

З діаграми термокінетического перетворення випливає, що при зварюванні сталі 12ХГ2НМФЦЛ у ЗТВ зварених з'єднань у широкому діапазоні швидкостей охолодження W_{550} утвориться бейнітно-мартенситна структура, що має ще й високу опірність утворенню холодних тріщин. Так, при швидкості охолодження

$W_{550}=25^{\circ}\text{C/s}$, що досягається при ручному дуговому наплавленні на масивну деталь електродом діаметром 3мм, у ЗТВ утвориться структура, що складається з 50% бейніту і 50% мартенситу. Отримана структура в ЗТВ без застосування попереднього підігріву забезпечує стійкість зварного з'єднання до утворення холодних тріщин. Оптимально обраний хімічний склад дозволяє звести до мінімуму негативний вплив легування на зварювальні властивості ливарної сталі і забезпечити її задовільну зварюваність з високим комплексом механічних властивостей. Застосування пропонованої сталі, умовно названої 12ХГ2НМФЦЛ, для великогабаритних відливок повинно забезпечити значну економію за рахунок зниження матеріалоємності і трудомісткості на їх виготовлення, розмір якого буде залежати від обсягу виробництва лито-зварних конструкцій на відповідних машинобудівних підприємствах.



Фіг.