

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА АРГОНОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20ГФЛ

Г.А. Околович, А.В. Габец, Е.О. Чертовских, В.Н. Шабалин

Рассмотрено влияние химического состава низкоуглеродистой стали 20ГФЛ на механические свойства, такие как относительное удлинение, относительное сужение, предел текучести, предел временного сопротивления, ударная вязкость KCU<sub>-60</sub> и KCV<sub>-60</sub>. В качестве математической модели использовали корреляционный и регрессионный анализ. В ходе работы установлено благоприятное воздействие внепечной обработки расплава в ковше аргоном, что приводит к стабилизации ударной вязкости KCV<sub>-60</sub>.

**Ключевые слова:** химический состав, механические свойства, аргон, низкоуглеродистая сталь, водород, азот, кислород, флокены, неметаллические включения.

В обычных «открытых» сталеплавильных процессах не удается уменьшить содержание водорода в готовой стали ниже 3-4 см<sup>3</sup>/100г, так как при кипении металла (выделение из ванны окиси углерода при окислении углерода) одновременно с удалением водорода и азота происходит поглощение их металлом из газовой фазы. При превращении α-железа в γ-железо, а также при повышении температуры растворимость Н и N скачкообразно увеличивается (рис. 1). Особое значение имеет резкое понижение растворимости Н и N в стали при затвердевании и дальнейшем понижении температуры. Например, растворимость водорода в жидком железе равна примерно 28 см<sup>3</sup>/100 г, а в твердом железе при комнатной температуре находится близко к нулю.

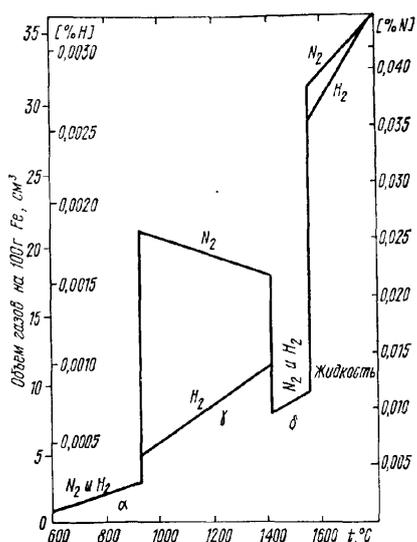


Рисунок 1 – Влияние температуры на растворимость Н и N в железе

Выделение водорода при охлаждении стали способствует образованию флокенов и межкристаллитных трещин. Флокены имеют вид сглаженных поверхностей матового цвета на сером фоне излома термообработанной отливки. Межкристаллитными трещинами являются сглаженные поверхности с зеркальным блеском на сером фоне излома термообработанной отливки.

По результатам электронной микроскопии на серийной стали 20ГЛ флокены и межкристаллитные трещины не выявлены. Также не выявлено ситовидных раковин характеризующихся дефектом в виде удлиненных тонких раковин, ориентированных нормально к поверхности отливки, вызванных повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое стали.

Для определения содержания газов (Н, О, N) в стали 20ГЛ были отобраны пробы из аварийной детали «Рама боковая». По результатам исследований, согласно, ГОСТ17745 содержание [O]=0,009-0,011%, [N]= 0,008-0,009%, [H]=0,0005%. Механические свойства стали данной детали соответствуют техническим требованиям.

Для выявления состояния N исследовали сталь 20ГЛ (микролегированную ванадием не более 0,03%) на масс спектроскопии (рис.2), в результате выявили, что имеющийся азот связан с ванадием в химические соединения типа VN, VC<sub>2</sub>N<sub>2</sub>.

Известно, что при содержании в стали Н более 2 см<sup>3</sup>/100г (0,0002%) и N более 2 см<sup>3</sup>/100г (0,002%) в стали проявляется хрупкость в виде понижения относительных сужения и удлинения, а иногда и ударной вязкости. Si и С понижают растворимость Н и N в жидком железе.

Таблица 1 - Химический состав сталей

Марка ста- ли	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
				не более				
20ГЛ	0,17-0,25	1,10-1,40	0,3-0,5	0,03	0,04	0,3	0,3	0,6
20ГФЛ	0,17-0,25	0,9-1,40	0,3-0,5	0,03	0,04	0,3	0,3	0,6

Особенно сильное воздействие на понижения содержания водорода оказывает кислород. Эффективным способом удаления неметаллических включений и газов (O, N, H) является продувка металла инертным газом, что приводит к одновременному протеканию многих процессов[2]:

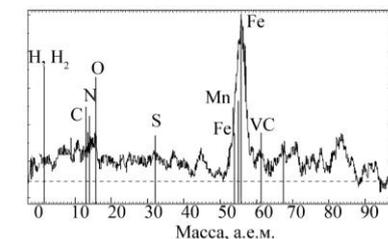
1) выравнивание, корректировка и установление требуемых значений температуры металла;

2) выравнивание, корректировка и регулировка химического состава;

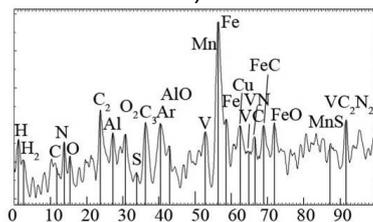
3) повышение чистоты стали по оксидным включениям;

4) снижение содержания серы и сульфидных включений при наличии покровного шлака необходимого состава;

5) ускорение расплавления и равномерного распределения по объему ковша вводимых раскислителей и легирующих добавок;



а).



б).

Рисунок 2 – а) - спектр масс вторичных ионов от области феррита в стали, б) - спектр масс вторичных ионов от области пер

б) ускорение нагрева и расплавления в покровном шлаке вводимых в ковш твердых шлакообразующих смесей;

7) улучшение условий протекания реакции окисления углерода при обработке не раскисленного металла;

8) снижение температуры разливки металла; Недостаток продувки аргоном в увеличение разрушения огнеупорной футеровки ковша.

В связи с этим для исследования использовали внепечную обработку аргоном, как наиболее целесообразную. Для продувки стали применяли аргон газообразный первого сорта ГОСТ 10157-79. Подачу газа в металл производили непосредственно через щелевую фурму, встроенную в футеровку днища 8 тонного стопорного ковша. Температура выпуска стали из печи ДСП-6 составляла 1610-1640°C. После слива металла в ковш, подували аргоном, в течении 3-6 мин при давлении 1-3,5 кг/см<sup>3</sup>. Во время заливки форм установлено повышение жидкотекучести металла, снижение температуры заливки форм. Химический анализ и механические свойства всех плавков соответствовали типовой марки стали 20ГФЛ (см.таблица 1)

С каждой плавки производили заливку клиновидной пробы по ГОСТ 977-88 для проведения механических испытаний, из которой изготавливали V- и U- образные образцы для испытания на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78 и образцы на растяжение по ГОСТ 1497-81, по которым в дальнейшем определяли предел текучести, предел временного сопротивления, относительное удлинение и сужение.

Цель эксперимента выявить влияние продувки аргоном стали на изменение связей между химическими элементами и механическими свойствами. Для анализа использовали результаты 60 плавков в дуговой печи, из которых 30 плавков подвергали внепечной обработке аргоном.

В качестве математической модели использовали корреляционный и регрессионный анализ. Любое значение коэффициента корреляции находится в диапазоне от -1 до +1. Корреляционный анализ устанавливает, ассоциированы ли наборы данных по величине, т. е. большие значения из одного набора данных связаны с большими значениями другого набора (положительная корреляция, знак «+») или наоборот, малые значения од-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА АРГОНОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20ГФЛ

ного набора связаны с большими значениями другого (отрицательная корреляция, знак «-» ), или значения двух переменных никак не связаны (корреляция равна 0).

Обсуждение результатов корреляцион-

ного анализа на типовых плавках (см. таблица 2). Отметим, что для наглядности данных в таблице представлены экстремумы наиболее сильных связей.

Таблица 2 - Корреляция типовых плавков и механических свойств

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>P</b>	<b>Al</b>
$\sigma_T$	-	-	-0,47	-0,42	-	-
$\sigma_B$	0,43	-	-0,38	-	-	-
$\delta$	-	-	-	-	-0,46	-
$\psi$	-	-	-	-	-0,48	-
<b>KCU<sub>-60</sub></b>	-0,45	-	-	-	-	0,45
<b>KCV<sub>-60</sub></b>	-	-	-	-	-	0,35

Прослеживаются наиболее сильные связи между углеродом и временным сопротивлением соответствует корреляции +0,43; KCU<sub>-60</sub> из двух выборок среднее +0,45. При корреляции использовались значения по двум испытаниям образцов для повышения уровня сходимости. Так KCV<sub>-60</sub> по двум выборкам в графе углерод имел одинаковые по знаку связи, но разные по значению более

чем в 2 раза (-0,1,-0,38). Подобная корреляционная связь наблюдается между показателем KCV<sub>-60</sub> в графе Si (-0,49, 0,19) и Mn, Ni Cu, S. Отметим, что связь между выборками KCU<sub>-60</sub> и C, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, S низкая при одинаковых показателях, что свидетельствует о нестабильных показателях ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом.

Таблица 3 - Корреляция плавков с аргоном и механических свойств

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Al</b>	<b>V</b>
$\sigma_T$	0,5	-	0,7	-	0,41	-0,5	0,35
$\sigma_B$	0,6	0,4	0,5	-	-	-0,4	-
$\delta$	-	-	-	-	-	-	-
$\psi$	-	-	0,4	-	-	-	-
<b>KCU<sub>-60</sub></b>	0,5	-	-	-0,3	-	0,6	-
<b>KCV<sub>-60</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-

В корреляционном анализе плавков с аргоном использовали значения KCU<sub>-60</sub> и KCV<sub>-60</sub> по двум испытанным образцам, также как и при типовых испытаниях, что было отмечено раньше. Корреляционная связь между KCU<sub>-60</sub> и Si, Mn, Cr, Ni, Cu, P, V низкая при схожих значениях. Корреляционная связь между KCV<sub>-60</sub> и C(0,05; -0,26), Si, Mn, Cr, Cu, S, P (-0,49;-0,12), Al (0,35; 0,1), V(-0,12; 0,09) может иметь в двух выборках высокие и низкие связи, что указывает на не стабильность параметра.

В результате корреляционного анализа можно сделать вывод:

1) при продувке аргоном наблюдается увеличение зависимости между  $\sigma_T$  и C в 2,5 раза;

2) KCU<sub>-60</sub> и C имеют отрицательный знак, и при продувке аргоном не наблюдается изменения связи;

3) значение зависимости между KCV<sub>-60</sub> и C после продувки увеличилось в 2 раза, что

свидетельствует об уменьшении KCV<sub>-60</sub> при увеличении содержания C;

4) после продувки аргоном наблюдается увеличение значения связей между Si и механическими свойствами в несколько раз. Так, на типовых плавках (таблица №2)  $\sigma_T$  после продувки изменил знак «-» на «+» в 4 раза;  $\sigma_B$  изменил знак «-» на «+» и увеличился в 7,5 раз;  $\psi$  после продувки аргоном изменил знак на минус и значение связи увеличилось в 4 раза. Это, вероятно, связано с тем, что Si при перемешивании ограничивает растворимость H в расплаве;

5) после продувки аргоном связь между Mn и  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  со знаком «+» увеличилась в 2,5 раза,  $\psi$  изменило знак на плюс в 7 раз;

6) после продувки аргоном связь между S и KCU<sub>-60</sub> по-прежнему имеет знак минус и увеличилась в 1,5 раза;

7) после продувки аргоном связь между P и  $\sigma_T$  увеличилась в 1,5 раза со знаком плюс. Ярко выражено изменение отрицательной

связи  $KCV_{-60}$  в 5 раз, что возможно свидетельствует о увеличении ударной вязкости при снижении фосфора в расплаве;

8) после продувки аргоном связь  $AI$  и  $\sigma_T$ ,  $\sigma_b$  по-прежнему остается отрицательной и при этом увеличивается в 2 раза. Связь  $AI$  и  $KCV_{-60}$  имеет «+» знак и после продувке аргоном увеличивается в 1,5 раза;

9) после продувки аргоном связь между  $V$  и  $\sigma_T$  изменила знак на «+» и увеличилась в 5 раз.

Одним из недостатков корреляционного анализа является отсутствие возможности определить показатель, влияющий на изменение свойств. Например, знак «+» приводит к увеличению двух сравниваемых величин, при этом неизвестно какой элемент из двух является зависимым. Поэтому был применен регрессионный анализ.

Регрессионный анализ применяется для подбора графиков с помощью метода наименьших квадратов. Регрессия используется для анализа воздействия на отдельную переменную значений одной или нескольких независимых переменных.

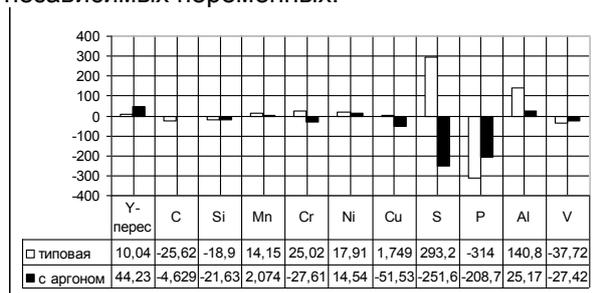


Рисунок 3 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции ударной вязкости,  $KCV_{-60}$

Из рис.3 и рис.4 видно, что после продувки аргоном содержание  $S$  в стали приводит к снижению ударной вязкости. Одновременно с этим типовая сталь имеет лучшие показатели ударной вязкости при более высоком содержании серы. Известно, что при низком содержании серы сталь приобретает повышенную склонность к водородному охрупчиванию. После продувки аргоном сера стала оказывать отрицательное влияние на ударную вязкость с  $V$ - и  $U$ -образным надрезом. Отрицательное влияние ванадия на ударную вязкость  $KCV_{-60}$  несколько снижается при продувке аргоном, в то же время на  $KCV_{-60}$  ванадий стал оказывать, положительный эффект. Положительное влияние серы на типовых сталях может быть связано с рафинированием стали силикокальцием. Он повышает величину ударной вязкости при всех значениях концентрации  $S$ , как в обла-

сти хрупкого, так и вязкого разрушения за счет увеличения работы зарождения трещины. При этом абсолютный прирост значений ударной вязкости практически не зависит от концентрации серы в стали[3].

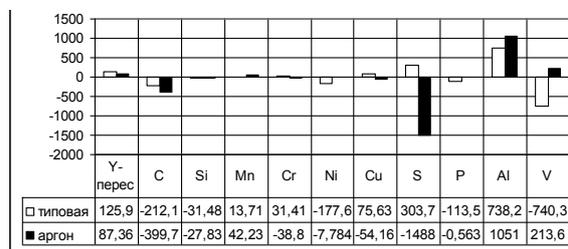


Рисунок 4 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции ударной вязкости,  $KCU_{-60}$

Благоприятное влияние ванадия на ударную вязкость на образцах с  $U$ -образным надрезом связано с образованием дисперсных включений карбида  $VC$  над сложной группой  $VC_2N_2$  и  $VN$ , образующихся в типовой стали в первую очередь из-за присутствия большого количества свободной энергии в компоненте  $N$ .

Возможно, при снижении содержания  $O$  в стали, снижается количество неметаллических включений типа  $Al_2O_3$ , присутствующих в стали в виде оксидных пленок, приводящих к снижению прочности стали. После продувки аргоном снизилось влияние фосфора на ударную вязкость при отрицательных температурах.

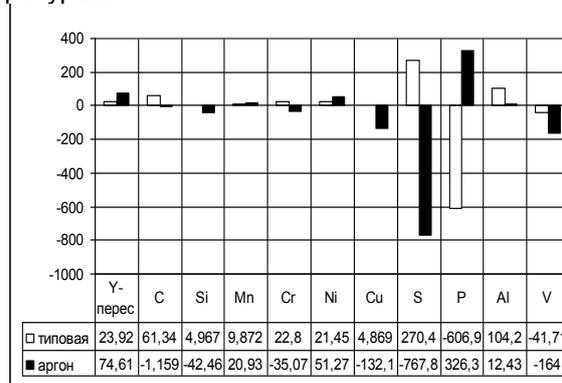


Рисунок 5 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции относительного сужения,

Ванадий на показатель сужения (рис.5) оказывает негативное влияние, снижая его величину. Взамен происходит повышение предела текучести (рис.7), который благоприятно влияет на выносливость стали. Сопоставив графики механических свойств сужения и удлинения (рис.6), можно утверждать, что они полностью однотипны, за исключением изменения удлинения в большую сторону на типовой стали, обладающей большей пла-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА АРГОНОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20ГФЛ

стичностью. После продувки аргоном сера стала оказывать отрицательное влияние на сужение и удлинение, в тоже время отрицательное влияние серы снизилось на временное сопротивление и предел текучести.

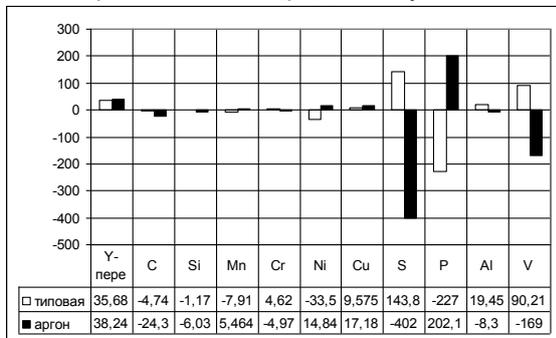


Рисунок 6 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции относительного удлинения,  $\delta$

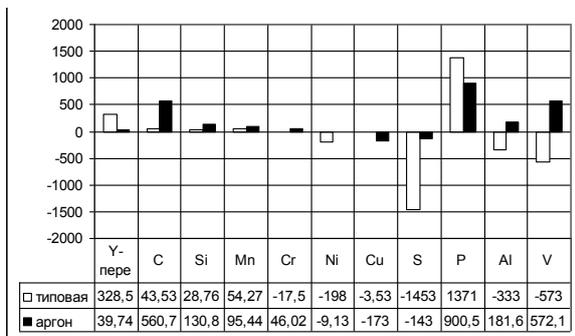


Рисунок 7 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции предела текучести,  $\sigma_T$

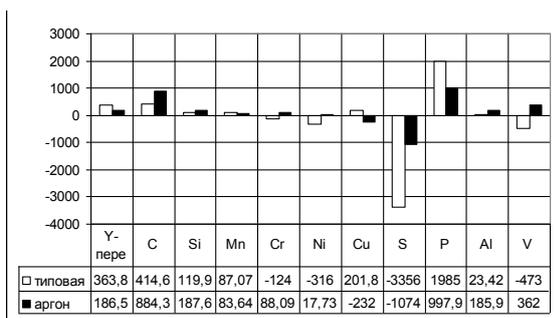


Рисунок 8 – Гистограмма коэффициентов регрессии функции предела временного сопротивления,  $\sigma_B$

В соответствии с графиком механических свойств после продувки аргоном показатель предела временного сопротивления (рис.8) при меньшем содержании углерода в стали обеспечивает прочностные свойства, не уступающие типовой стали. Это свидетельствует о наличии фазового равновесия.

На основании полученной регрессии предела текучести в стали после продувки аргоном выявлена зависимость между содержанием углерода и ванадия. Установлено, что вследствие перемешивания сплава и снижения содержания неметаллических включений, очистки от газов (H, N, O), наблюдается повышение жидкотекучести стали, обеспечивается однородная структура, при этом центрами кристаллизации являются карбиды VC..

### Выводы:

После внепечной обработки расплава аргоном в 8 тонном ковше выявлены следующие различия в сравнении с типовой плавкой стали 20ГФЛ:

- 1) положительное влияние P в количестве 0,01-0,03% на все механические свойства;
- 2) усиление отрицательного влияния S в количестве 0,01-0,02%;
- 3) стабилизация показателя KCV<sub>60</sub> являющегося характеристикой работы зарождения трещин. Это подтверждается повышением чистоты стали по неметаллическим включениям на границах зерен;
- 4) продувка аргоном обеспечивает частичное выведение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлак;
- 5) продувка аргоном обеспечивает выведение в шлак AlN и снижает дисперсность хрупких неметаллических включений в зерне и по его границам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев - Донецк, 1979г.-280с.
2. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. – М.: Металлургия. 1992.-336с.
3. Филиппенков А. А. Ванадийсодержащие стали для отливок. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.

**Околович Г.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой МТuО,  
**Габец А.В.**, аспирант,  
**Чертовских Е.О.**, аспирант  
 e-mail: karpov43@list.ru

**Шабалин В.Н.** к.т.н., профессор, проф. каф. МБСП тел. 8(3852) 290-879;  
 email: svarka-biznes@mail.ru  
 ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»