

УДК 669.295

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КРЕМНИЙ-МАРГАНЦОВИСТЫХ СТАЛЕЙ

Н. Е. Калинин, Т. В. Носова

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

Механические свойства полуфабрикатов и готовых изделий определяются химическим составом металла, технологией обработки давлением, режимами термической обработки [1; 2]. Степень влияния на каждую из механических характеристик концентраций легирующих элементов и примесей, температуры и времени термообработки может быть различной. Целью данной работы являлось установление влияния режимов термической обработки и химического состава как факторов, оказывающих основное влияние на механические свойства крупногабаритных заготовок кремний-марганцевистой из стали 17Г1С. Эта сталь широко применяется в машиностроении для изготовления валов, осей, крупногабаритных изделий ответственного назначения, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Требования ТУ (технических условий) по химическому составу и механическим свойствам данной стали представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав стали 17Г1С

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
Концентрация, %	0,15–0,22	0,55–0,58	1,0–1,6	0,035	0,035	0,030	0,030	0,02–0,05

Примечание: если не указаны пределы, то приведено максимальное содержание элементов.

Таблица 2

Механические свойства стали 17Г1С

Диаметр изделия, мм	Механические свойства			
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ISO – V ₋₂₀ °C
≤ 500	≥ 275	≥ 450	≥ 18	≥ 30
> 500	≥ 265	≥ 450	≥ 18	≥ 27

Был проанализирован массив статистических данных по механическим свойствам более 100 промышленных заготовок после термической обработки более чем по 20 режимам. Режимы термической обработки включали нормализацию с варьированием температуры и времени выдержки, а также скорости охлаждения; нормализацию с дополнительным отпуском; закалку и отпуск с варьированием параметров каждой из операций; гомогенизацию с последующими закалкой и отпуском.

Поскольку стабильность является одним из основных требований, предъявляемых к механическим свойствам, определяли значения коэффициентов вариации всех характеристик: предела прочности (σ_B),

предела текучести ($\sigma_{0.2}$), относительного удлинения (δ), относительного сужения (ψ), работы удара (ISO -V_{-20°C}) (рис. 1).

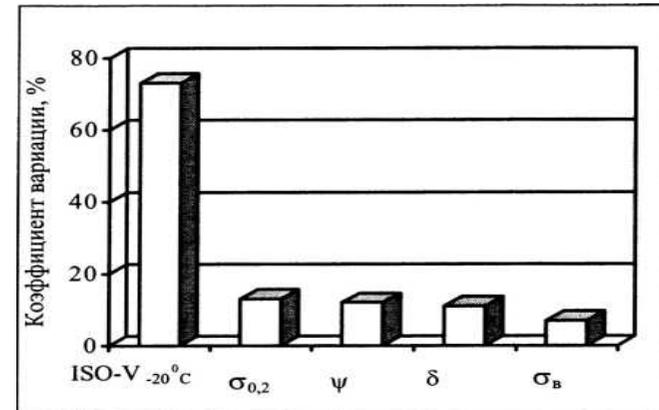


Рис. 1. Коэффициенты вариации значений механических свойств стали

Как видно из диаграммы, наибольший разброс имели значения работы удара (коэффициент вариации 73 %), значения остальных свойств были относительно стабильными (коэффициент вариации предела прочности составляет 7 %, относительного удлинения и относительного сужения – 11 и 12 % соответственно). Анализ также показал, что у 39 % поковок механические свойства в основном, значения работы удара не соответствовали требованиям ТУ.

При получении механических свойств ниже необходимого уровня поковки повторно термообработывали, используя:

- повторную нормализацию;
- повторную нормализацию с отпуском;
- закалку и отпуск с варьированием параметров каждой из операций;
- гомогенизацию с последующими закалкой и отпуском.

Повторной термической обработкой удалось повысить значения характеристик до требуемого уровня только для 8 % заготовок. Термическая обработка (нормализация) обеспечивала требуемый комплекс свойств для одних плавок, но не давала положительных результатов для других.

Для установления влияния параметров нормализации на механические свойства исследуемой стали вычисляли коэффициенты парной корреляции их с температурой и временем (рис. 2).

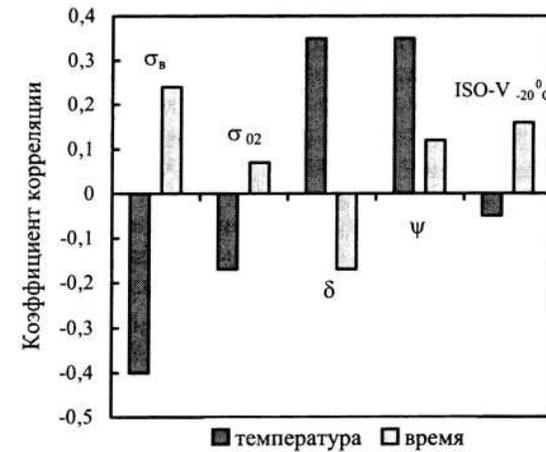


Рис. 2. Коэффициенты корреляции механических свойств стали 17Г1С с параметрами нормализации

Как следует из приведенных данных, повышение температуры нормализации способствовало снижению предела прочности (коэффициент корреляции равнялся -0,40), возрастанию относительного удлинения и относительного сужения (коэффициенты корреляции имели одинаковые значения, равные 0,35). Это могло быть связано с ростом аустенитного зерна при повышении температуры нагрева и формированием более грубой структуры при охлаждении заготовок.

Увеличение длительности выдержки способствовало повышению предела прочности (коэффициент корреляции 0,24) и относительного сужения (коэффициент корреляции 0,12), вызывая при этом снижение относительного удлинения (коэффициент корреляции равнялся -0,17). Коэффициент корреляции работы удара с температурой нормализации составлял всего -0,05, а со временем – 0,16, т. е. изменение температуры нормализации практически не влияло на значения работы удара, а увеличение времени выдержки несколько их повышало. Следовательно, режимы нормализации в большей степени влияли на прочность и пластические характеристики и в меньшей – на работу удара.

Известно, что на механические свойства стали существенное влияние оказывает ее химический состав. Степень стабильности концентраций легирующих элементов и примесей оценивали по значениям коэффициентов вариации, которые приведены на рисунке 3.

Как видно из гистограммы по контролируемым компонентам химического состава, наибольший разброс имел алюминий (коэффициент вариации составлял 58 %). Анализ показал, что около 30 промышленных плавков не соответствовали требованиям ТУ по содержанию этого элемента, которое должно находиться в пределах 0,02–0,05 %.

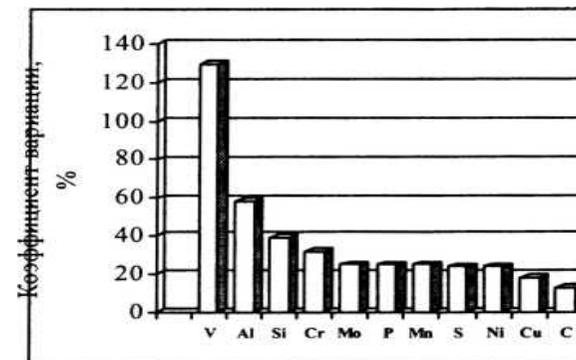


Рис. 3. Коэффициенты вариации содержания компонентов стали

Для оценки влияния химического состава на механические свойства определяли коэффициенты парной корреляции характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости с концентрациями легирующих элементов и основных примесей. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции механических свойств с концентрацией легирующих элементов и примесей стали 17Г1С

Свойств	Коэффициенты корреляции							
	Легирующие элементы и примеси							
a	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
σ_B	0,66	0,36	0,42	-0,05	-0,28	0,06	-0,11	-0,16
Σ_B	0,34	0,21	0,34	-0,03	-0,24	0,08	0,03	0,07
δ	-0,41	-0,42	-0,24	-0,09	0,25	0,04	0,13	0,22
ψ	-0,26	-0,42	-0,02	0,07	0,11	-0,04	0,03	0,14
ISO-V ₋₂₀ °с	-0,29	-0,15	0,16	-0,30	-0,10	-0,08	0,21	0,30

Критическое значение коэффициента парной корреляции для 100 измерений с вероятностью 0,95 равно 0,2. С учетом этого для предела прочности и предела текучести существенным было влияние углерода, марганца, кремния. Известно, что эти элементы являются основными упрочнителями кремний-марганцовистых сталей.

Марганец сильнее, чем кремний, действует как упрочнитель, в меньшей степени снижая пластичность и не вызывая уменьшения ударной вязкости. Он снижает температуру полиморфного превращения и, тем самым, обуславливает измельчение зерна. При повышении содержания кремния увеличивается вероятность образования крупных неметаллических включений (силикатов), чаще всего в виде узких полос вдоль направления

деформации. Кремний в низколегированных сталях отрицательно влияет на пластичность, ударную вязкость, хладостойкость. Отрицательное влияние на характеристики прочности оказывала сера.

Для относительного удлинения значимыми были коэффициенты парной корреляции с кремнием, углеродом, серой, марганцем, алюминием. При этом повышение содержания элементов-упрочнителей вызывало снижение относительного удлинения, а повышение концентрации серы и алюминия оказывало положительное влияние. Как показано в работе [3], такое влияние серы обусловлено ее взаимодействием с другими элементами, в частности, с марганцем, который связывает ее в устойчивое пластичное соединение MnS, устраняя охрупчивающее влияние Fe. Кроме того, сульфиды марганца сдвигают точку плавления сульфидной эвтектики к более высоким температурам, что способствует их распределению в виде точечных включений, а не в виде сетки по границам зерен.

На относительное сужение, наиболее структурно чувствительную характеристику, существенно влияли только углерод и кремний, повышение содержания которых вызывало снижение относительного сужения.

Для работы удара проанализировали массив значений ISO-V₂₀ °C. Критическая величина коэффициента парной корреляции равнялась 0,11. Работа удара оказалась чувствительной к изменению концентраций большего числа компонентов, таких как алюминий, фосфор, углерод, молибден, никель, марганец, кремний. Наибольшее влияние на нее оказывали алюминий, фосфор, углерод. Увеличение концентрации алюминия способствовало повышению значений работы удара, а возрастание концентрации фосфора и углерода – ее уменьшению. Полученная зависимость закономерна, так, и фосфор, и углерод вызывают снижение характеристик вязкости. Это снижение тем значительней, чем больше углерода в стали. Частицы цементита, количество которых возрастает пропорционально концентрации углерода, препятствуют движению дислокаций, являются дополнительными концентраторами напряжений. Воздействие углерода для крупногабаритных полуфабрикатов усиливается из-за того, что по границам зерен успевают выделиться мелкие карбиды, которые вызывают их охрупчивание. Фосфор, растворяясь в феррите, сильно искажает его кристаллическую решетку, уменьшает работу развития трещины, повышает порог хладноломкости.

Влияние алюминия обусловлено тем, что он, являясь одним из сильнейших раскислителей, обеспечивал выведение кислорода из расплава стали. При введении недостаточного количества этого элемента (алюминия) сталь получается недораскисленной с повышенной концентрацией кислорода в виде оксидов железа и др. Примеси же внедрения (кислород и азот) в малых количествах слабо влияют на многие свойства, но значительно снижают значения работы удара и резко уменьшают хладноломкость. Именно это могло быть причиной снижения величины работы удара при удовлетворительных значениях остальных механических характеристик. Кроме того, алюминий способствует увеличению протяженности межфазных границ. Он вызывает формирование

наследственно мелкозернистой структуры вследствие образования по границам зерен множества мельчайших частиц оксидов и нитридов алюминия.

Существенное влияние химического состава на механические свойства, в частности, на работу удара, подтверждает тот факт, что при неблагоприятном сочетании концентраций компонентов даже повторными операциями горячей обработки давлением и термической обработки по разным режимам не удастся обеспечить требуемые механические свойства. В таблицах 4, 5 приведены химический состав и механические свойства двух плавков, характеристики одной из которых соответствовали требованиям ТУ, а другой – нет.

Таблица 4

Химический состав стали 17Г1С

Плав-ка	Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
53394	Концент-рация, %	0,21	0,50	1,24	0,034	0,017	0,20	0,20	0,005
14196		0,19	0,10	1,55	0,029	0,026	0,16	0,22	0,03

Таблица 5

Механические свойства крупногабаритных поковок из стали 17Г1С

Обработка давлением	Термическая обработка	Механические свойства				
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	ISO-V ₋₂₀ °C
Плавка 53 394						
Свободная ковка Ø > 500 мм	Нормализация	340	530	24	46	6, 8,5
	Закалка + отпуск	370	610	21	40	7, 7,7
	Дополнительный отпуск	330	530	29	64	16, 12, 18
Переков на Ø < 500 мм	Нормализация	310	540	26	62	8, 6,9
	Гомогенизация, закалка + отпуск	350	600	22	52	20, 22, 11
Плавка 14 196						
Свободная ковка Ø > 500 мм	Нормализация	285	490	30	75	120, 140, 170

Как видно из данных таблицы 5, для поковки плавки 53 394 ни один из режимов повторной термической обработки не дал положительных результатов. Даже повторная обработка давлением с уменьшением диаметра поковки и нормализация не обеспечили требуемый уровень работы удара. Гомогенизация с последующими закалкой и отпуском, проведенными после нормализации, также не дали положительных результатов. Металл плавки 14 196 после нормализации имел свойства, соответствующие требованиям ТУ.

Микроструктура стали плавки 14 196 была более однородной с колониями перлита меньшего размера, большей протяженностью межфазных

границ. Это способствовало равномерному распределению вредных примесей в микрообъемах металла и, как следствие, повышению значений структурно-чувствительных характеристик, относительного удлинения и работы удара.

Образование более дисперсной структуры, по-видимому, связано с влиянием алюминия, который способствует формированию наследственно мелкозернистой структуры за счет скопления по границам зерен мельчайших частиц оксидов и нитридов.

Анализ химического состава стали 17Г1С показал, что в металле плавки 53 394 концентрация алюминия была крайне низкой, а именно, этот элемент имел с работой удара наибольший положительный коэффициент корреляции. Концентрации фосфора, углерода и кремния находились почти на верхнем пределе их содержания. Коэффициенты же корреляции этих элементов с работой удара были отрицательными, т. е. увеличение их концентрации вело к уменьшению величины работы удара. Металл плавки 14 196 содержал достаточное количество алюминия (0,03 %), меньшее количество кремния и фосфора.

Таким образом, установлено, что на уровень механических свойств крупногабаритных заготовок из стали 17Г1С оказывали влияние как режимы термической обработки, так и химический состав. При этом на характеристики прочности и пластичности воздействия указанных факторов было сравнимым (коэффициенты корреляции были соизмеримы), а на работу удара в большей степени влиял химический состав, особенно содержание алюминия.

Добиться необходимой стабильной концентрации алюминия и снижения содержания вредных примесей в расплаве можно путем использования технологических добавок [4; 5], апробированных с положительным эффектом на семи металлургических заводах Украины и России при внепечной обработке более чем 30 марок сталей мартеновского и конвертерного способов производства.

Литература

1. Богуслаев В. А. Авиационно-космические материалы и технологии / В. А. Богуслаев., А. Я. Качан, Н. Е. Калинина, В. О. Мозговой, В. Т. Калинин// Запорожье : Мотор Сич, 2009. – 385 с.
2. Мозберг Р. К. Материаловедение / Р. К. Мозберг // М : Высшая школа, 1991. – 448 с.
3. Шаповалова О. М. Взаимодействие серы с марганцем в стали 07ЮТ, обработанной технологическими добавками из отходов аэрокосмической промышленности / О. М. Шаповалова, Т. В. Носова // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т. 8. – № 1. – С. 157–159.
4. Шаповалова О. М. Комплексное влияние элементов химического состава на свойства поковок из стали 17Г1С / О. М. Шаповалова, А. В. Калинин, Ю. А. Ем // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. "Стародубовские чтения-2002". – Дн-вск : ПГАСА, 2002. – С. 18–20.
5. Деклараційний патент 53197А України, МКІ С22С35/00. Комплексний

розкислювач для обробки сталей і сплавів та способів його одержання /
О. М. Шаповалова, О. В. Шаповалов. Опубл. 2003, Бюл. № 1.