

6
А-61

С.М.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант БЛЕСКУН В. Ф.

ИЗЫСКАНИЕ СОСТАВА И РАЗРАБОТКА
РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ
ДЛЯ КРУПНЫХ ПРУЖИН
УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Специальность № 05—320 «Металловедение
и термическая обработка металлов»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Л.

Д О Н Е Ц К — 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант БЛЕСКУН В. Ф.

ИЗЫСКАНИЕ СОСТАВА И РАЗРАБОТКА
РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ
ДЛЯ КРУПНЫХ ПРУЖИН
УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Специальность № 05—320 «Металловедение
и термическая обработка металлов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



ДОНЕЦК—1971

Работа выполнена в Донецком политехническом институте, институте «Гипрошауглеобогащение» и на заводе угольного машиностроения имени Пархоменко в г. Ворошиловграде.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

доцент, кандидат технических наук *В. А. Харченко*,
профессор, кандидат технических наук *А. Л. Симонов*.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук, профессор *К. Н. Соколов*,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник *В. С. Коваленко*.

Ведущее предприятие—Институт проблем литья АН УССР

Автореферат разослан *23 октября* . . . 1971 г.

Защита диссертации состоится *26 ноября* . 1971 г.
на заседании Ученого Совета металлургического и химико-технологического факультетов Донецкого политехнического института, 340066, г. Донецк-66, Артема, 58, ДПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета,
кандидат технических наук,
доцент *А. Г. Гудзь*.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для решения задачи значительного подъема материального и культурного уровня жизни народа, намеченной XXIV съездом КПСС, большое внимание должно быть уделено повышению надежности и долговечности деталей и машин путем разработки и применения конструкционных материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Несмотря на то, что в последнее время значительно повысились производительность углеобогачительных машин, рабочие напряжения в деталях и частота их нагружения, для крупных пружин этих машин применяются до настоящего времени стали 65Г и 60С2, обладающие сравнительно низким комплексом механических и технологических свойств. Исследования показали, что преждевременный выход пружин из строя связан со значительными простоями углеобогачительного оборудования, а недостаточная их релаксационная стойкость является причиной резкого увеличения динамических нагрузок на детали машин и фундамент зданий. В связи с этим необходимы исследования, направленные на повышение свойств стали для пружин углеобогачительных машин и прежде всего ее усталостной прочности и релаксационной стойкости.

Цели и задачи исследования. Целью настоящей работы является повышение работоспособности крупных пружин углеобогачительных машин путем изыскания рационального состава стали для пружин и оптимального режима их термической обработки.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи: 1) анализ существующих составов пружинных сталей и методов их упрочнения; 2) исследование возможности повышения работоспособности пружин углеобогачительных машин, изготовленных из стали 60С2 путем применения изотермической обработки; 3) исследования пружинных сталей с различным содержанием хрома, марганца и кремния с целью определения состава, обеспечивающего высокий уро-

вень механических свойств и сквозную прокаливаемость прутков диаметром до 35 мм при изотермической закалке; 4) исследование возможности повышения свойств пружинной стали путем модифицирования ее ниобием; 5) выбор оптимального режима термической обработки разработанной марки стали для пружин; 6) исследование эксплуатационных характеристик натуральных пружин с целью определения технико-экономической эффективности применения пружин из разработанной марки стали и режима термической обработки.

Общая методика выполнения исследований. Исследования проводили на стали 60С2, а также на 12 составах пружинной стали лабораторных (2—9) и промышленных (10—13) плавов (табл. 1).

Механические характеристики при растяжении определяли на стандартных габаритных образцах, ударную вязкость — на образцах с надрезом по Менаже, предел выносливости при симметричном нагружении на базе $5 \cdot 10^6$ циклов — на образцах диаметром 7,5 мм. Для определения предела упругости была сконструирована специальная установка и разработан образец и методика. Механические свойства сталей определяли после закалки в масле и отпуска в температурном интервале 300—500°C через каждые 50°, после изотермической закалки при температурах 280—350°C через каждые 25—30°, а также после изотермической закалки и дополнительного отпуска в температурном интервале 300—450°C через каждые 50°.

Таблица 1

Химический состав опытных сталей, %

№ плавки	Марка стали	Углерод	Марганец	Кремний	Хром	Ниобий
1	60С2	0,60	0,77	1,82	0,07	—
2	60	0,65	0,26	0,17	—	—
3	60Г2	0,63	2,05	0,35	—	—
4	60Х2	0,57	0,47	0,29	2,02	—
5	60ГС	0,64	1,16	1,27	—	—
6	60ХГ	0,60	0,78	0,29	1,08	—
7	60ХГБ	0,55	1,02	0,44	1,20	0,033
8	60ХГС2	0,60	0,94	2,08	1,16	—
9	60ХГС2Б	0,59	0,94	2,00	1,17	0,072
10	60ХГС	0,60	0,89	1,31	1,20	—
11	60ХГСБ I	0,57	0,86	1,27	1,23	0,033
12	60ХГСБ II	0,56	1,33	1,20	1,20	0,033
13	60ХГСБ III	0,58	0,86	0,90	0,75	0,024

Примечание. Содержание серы и фосфора в сталях не превышало 0,020% каждого.

Продолжительность выдержки при изотермической закалке составляла 30 мин. для стали 60С2 и 60 мин. для сталей, легированных совместно хромом, марганцем и кремнием.

Определение критических точек, а также изучение объемных эффектов при отпуске закаленной стали проводили на дилатометре ДКМ, устойчивость переохлажденного аустенита изучали на анизометре Н. С. Акулова.

Флокеночувствительность сталей проверяли на пробе длиной 700 мм и сечением 270×270 мм, отрезанной от прокатанной на блюминге заготовки после удаления ее переднего конца. Для изучения влияния ВТМО на механические свойства и тонкую структуру стали прутки диаметром 16 мм сразу после прокатки закачивали на специальной установке, время от выхода из чистовой клетки до закалки составляло 17—25 сек., суммарное относительное обжатие — 90%.

Усталостные испытания натуральных пружин (диаметр прутка 16 мм, наружный диаметр 112 мм, шаг 36 мм, число рабочих витков 10) проводили на воздухе и в шахтной воде при напряжениях в 1,5—2 раза выше максимальных напряжений, возникающих в пружинах при работе грохотов, релаксационную стойкость определяли после выдержки пружин при этих же напряжениях в течение 100 часов.

Научная новизна. Исследован широкий комплекс механических, физических и технологических свойств группы пружинных сталей после различных режимов обычной и изотермической обработки. Впервые изучено влияние малых добавок ниобия на свойства хромомарганцевокремнистой пружинной стали.

Практическая ценность. Установлены состав и режим термической обработки стали, обеспечивающие повышение релаксационной стойкости и долговечности пружин — основных характеристик, определяющих их работоспособность, не менее чем в 2 раза по сравнению с применяемой в настоящее время для пружин углеобогащительных машин сталью 60С2.

Реализация работы в промышленности. Пружины из разработанной стали, термически обработанные по установленному режиму, прошли стендовые испытания. Заводом угольного машиностроения имени Пархоменко и институтом «Гипромашуглеобогащение» принято решение об установке этих пружин на грохотах Ясиноватского коксохимического завода. Применение пружин из разработанной марки стали и установленного оптимального режима термической обработки только на заводе имени Пархоменко обеспечит экономию в народном хозяйстве не менее 140000 руб. в год при работе пружин в отсутствии агрессивной среды и 39200 руб. в год при наличии агрессивной среды.

Апробация работы. Работа доложена на трех научно-технических конференциях Донецкого политехнического института, объединенном научно-техническом совете института «Гипромашуглеобогащение» и завода угольного машиностроения имени Пархоменко, научном семинаре по металловедению Ждановского металлургического института.

Публикация. По результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 7 статей.

Объем работы. Работа состоит из 6 разделов, содержит 142 страницы машинописного текста, 17 таблиц и 20 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Влияние режимов термической обработки на свойства стали 60С2

Зависимость механических свойств опытной стали от температуры отпуска после закалки в масле, а также от температуры охлаждающей среды при изотермической закалке приведена в табл. 2.

Исследования показали, что при повышении температуры отпуска пределы прочности, текучести, упругости и выносливости вначале повышаются, достигая максимального значения при 350°C, а затем происходит заметное их снижение. После изотермической и обычной обработки на твердость HRC 53—54

Таблица 2

Влияние режимов термической обработки на механические свойства стали 60С2

Закалка	Температура отпуска или изотермической выдержки, °C	HRC	$\sigma_{\text{в}}$ кГ/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кГ/мм ²	δ_5 %	ψ %	α_H кГ/мм ²	$\sigma_{0,005}$ кГ/мм ²	σ_{-1} кГ/мм ²
Обычная	300	52—54	219	198	6,5	26,3	2,5	112	65
	350	53—55	225	210	7,6	27,7	2,0	130	81
	400	49—50	206	196	7,9	35,4	2,8	115	79
	450	44—46	160	146	9,9	37,3	3,3	106	70
Изотермическая	275	52—54	190	150	8,3	25,2	—	73	65
	300	49—51	176	142	8,6	36,3	—	72	70
	325	44—46	147	119	15,7	39,5	—	72	—
	350	38—40	123	102	23,1	47,5	—	70	63

(изотермическая закалка 275°C и закалка в масле, отпуск 350°C) сталь имеет примерно одинаковые пластические свойства, однако предел прочности в первом случае составил 190 кГ/мм², а во втором — 225 кГ/мм², еще больше отличаются пределы текучести, которые равны соответственно 150 и 210 кГ/мм². Значительно более низкие, чем после обычной обработки, оказались пределы упругости и выносливости изотермически закаленной опытной стали. Обработка на твердость HRC 49—51 (изотермическая закалка 300°C и закалка в масле, отпуск 400°C) также не выявила преимуществ изотермической закалки. При твердости HRC 44—46 относительное удлинение изотермически закаленной стали примерно в 1,6 раза выше, однако и в этом случае пределы прочности, текучести, упругости и выносливости оказались ниже, чем у стали, обработанной обычным способом на ту же твердость.

После изотермической закалки при всех исследованных температурах выдержки предел упругости опытной стали оказался при равной твердости примерно в 1,5—1,8 раза ниже, чем после обычной термообработки. Можно предположить, что причиной более низких значений предела упругости стали после изотермической обработки является повышенное количество остаточного аустенита, которое составляет согласно измерениям, проведенным нами и другими авторами, 12—14%. Обработка холодом сразу после изотермической закалки не дала положительных результатов: количество остаточного аустенита и предел упругости практически не изменились.

Исследование влияния температуры дополнительного отпуска после изотермической закалки при различных температурах выдержки на механические свойства стали показало, что отпуск в температурном интервале 225—375°C не оказывает заметного влияния на предел прочности и пластические свойства, однако существенно повышает пределы текучести и упругости. Так у стали, изотермически закаленной при 275°C, предел текучести и упругости составил соответственно 150 и 73 кГ/мм², а после дополнительного отпуска при температуре 325°C—173 и 88 кГ/мм².

При изотермической закалке заготовок ударных образцов сечением 11×11 мм было обнаружено, что последние не удается закалить на требуемую для пружин твердость в связи с недостаточной прокаливаемостью стали 60С2 исследуемого состава.

Таким образом, основная характеристика, определяющая работоспособность пружин углеобогащательных машин, — предел выносливости имеет максимальное значение после закалки стали в масле и отпуска при температуре 350°C, а пластические свойства после такого режима термообработки со-

ответствуют нормам, рекомендуемым Н. А. Минкевичем для пружин. Однако при повышении температуры отпуска от 350 до 400°C, сопровождающемся незначительным снижением предела выносливости, увеличивается отношение σ_{-1}/σ_B и, следовательно, уменьшается чувствительность стали к концентраторам напряжений, поэтому для пружин углеобогащенных машин, изготавливаемых из горячедеформированного металла и имеющих значительные концентраторы напряжений, отпуск должен проводиться в интервале температур 400—450°C (HRC 46—50). Исследование преждевременно вышедших из эксплуатации пружин показало, что большинство из них имело твердость как выше HRC 50, так и ниже HRC 46.

При изотермической закалке стали 60С2 исследованного состава необходимая для пружин твердость не достигается на прутках диаметром выше 10—12 мм, поэтому возможность повышения работоспособности крупных пружин углеобогащенных машин путем применения изотермической закалки должна быть изучена на сталях с более высокой прокаливаемостью.

Исследование пружинных сталей лабораторных плавок

Исследование проводили на сталях плавок 2—9 (табл. 1). Среднее содержание углерода для всех опытных сталей было принято 0,60%. Такое содержание углерода следует, по-видимому, считать оптимальным для стали тяжело нагруженных пружин, испытующих значительные динамические нагрузки: при меньшем его содержании сталь имеет пониженную закалываемость и, как следствие, пониженную усталостную прочность, а при большем — пониженную пластичность. Основными легирующими элементами, принятыми для исследования, являются кремний, марганец и хром. Исследования проводили на сталях с различной комбинацией этих элементов с целью получения оптимального сочетания структурных и концентрационных неоднородностей строения при изотермической закалке, сообщаящей стали высокий комплекс механических свойств. Плавки 7 и 9 дополнительно модифицировали ниобием. Основными критериями при оценке свойств стали являлись возможность получения сквозной прокаливаемости прутков диаметром 30—35 мм в условиях изотермической закалки, а также уровень прочностных и пластических свойств после обычной закалки с отпуском и изотермической закалки на ту же твердость.

Полученные данные позволили заключить, что только стали плавок 8 и 9, легированные совместно хромом, марган-

цем и кремнием, обеспечивают сквозную прокаливаемость требуемых сечений при изотермической закалке. Прокаливаемость стали, модифицированной ниобием, оказалась несколько ниже, чем стали без ниобия, но с таким же содержанием основных легирующих элементов. Исследования показали, что при повышении температуры аустенитизации от 860 до 1050°C (температура нагрева пружин для навивки) наблюдается значительное увеличение прокаливаемости опытных сталей, причем прокаливаемость стали с ниобием оказалась в этом случае несколько выше, чем у стали аналогичного состава, но без ниобия.

Исследование влияния обычной и изотермической обработки на механические свойства при растяжении опытных сталей показало, что наиболее высоким комплексом прочностных и пластических свойств как после обычной термообработки, так и после изотермической закалки обладают стали, легированные хромом, а также комплексно легированные хромом, марганцем и кремнием. Пластические свойства этих сталей после изотермической закалки выше, чем после обычной термообработки на ту же твердость. Модифицирование ниобием не вызвало повышения прочностных и пластических свойств стали. Можно предположить, что ниобий, частично находясь в α -твердом растворе, располагается преимущественно по границам зерен, увеличивая связь между ними и поэтому наиболее эффективно он должен повышать характеристики стали, особо чувствительные к состоянию границ зерен — ударную вязкость и усталостную прочность.

Таким образом, исследования сталей лабораторных плавок показали, что высокими механическими и технологическими свойствами обладают стали, комплексно легированные хромом, марганцем и кремнием. Для обеспечения сквозной прокаливаемости прутков диаметром 30—35 мм при изотермической закалке содержание указанных элементов в стали должно, по-видимому, находиться в пределах 1,0—1,3% каждого. Установлено также, что изотермическая закалка на нижний бейнит повышает механические свойства хромомарганцевокремнистой стали по сравнению с обычной обработкой.

С целью определения оптимального содержания хрома, марганца и кремния в пружинной стали и изучения влияния ниобия как модификатора на физические, механические и технологические свойства, а также определения режима термообработки, обеспечивающего наилучший комплекс механических свойств, в промышленной электропечи было выплавлено 4 состава опытной хромомарганцевокремнистой пружинной стали.

Исследование физических и технологических свойств пружинных сталей промышленных плавов

Исследования проводили на сталях плавов 10—13 (табл. 1). Составы плавов 10 и 11 были намечены с целью изучения влияния модифицирования ниобием на свойства стали, состав плавки 12 — для изучения целесообразности повышения содержания марганца до 1,3—1,4%, а плавки 13 — для определения минимальной степени легирования опытной стали.

При определении критических точек было установлено, что в исследуемом количестве ниобий не оказывает влияния на положение точек A_{c1} и A_{c3} .

Дилатометрическое исследование закаленной изотермически и в масле стали опытных плавов показало, что модифицирование ниобием не оказывает влияния на температурные границы процессов, происходящих при отпуске. Уменьшение длины образца, вызванное уменьшением тетрагональности кристаллической решетки α -фазы, начинается у всех плавов закаленной в масле опытной стали при температуре 100°C. Следовательно, изменение содержания легирующих компонентов в исследуемых пределах не оказывает влияния на температурный интервал первого превращения при отпуске. Удлинение образца, вызванное распадом остаточного аустенита, начинается у всех плавов при температуре 210°C, а заканчивается при температуре 360°C у менее легированной плавки 13 и 390°C — у остальных плавов. Изменение степени легирования заметно сказывается и на температурный интервал третьего превращения при отпуске: наиболее интенсивно оно протекает при температуре отпуска до 450°C в менее легированной плавке и до 480°C у остальных плавов.

На дилатограммах, полученных для изотермически закаленных при температуре 300°C сталей, уменьшение длины образца, обусловленное выделением углерода из пересыщенного α -раствора, не наблюдалось. При температуре отпуска 300°C на дилатограммах наблюдается перегиб, свидетельствующий о начале распада остаточного аустенита, однако объемный эффект этого превращения оказался меньшим, чем у закаленной в масле стали, что можно объяснить стабилизацией остаточного аустенита при изотермической выдержке, вследствие чего скорость его распада уменьшается, а температура конца распада повышается с 360 до 400°C в менее легированной плавке и с 390 до 420°C в остальных плавках.

Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита стали опытных плавов строили при температуре аустенитизации 860 и 1050°C. Исследования показали, что при температуре аустенитизации 860°C добавка ниобия в количе-

стве 0,033% несколько уменьшила устойчивость переохлажденного аустенита в верхней субкритической области. Инкубационный период в зонах минимальной устойчивости аустенита стали плавов 10 и 11 составил 30 и 25 сек при температуре 640°C, а при температуре 400°C — 100 и 70 сек соответственно. При увеличении содержания марганца от 0,86 до 1,33% (плавки 11 и 12) продолжительность инкубационного периода увеличилась с 25 до 30 сек при температуре 640°C и с 70 до 80 сек при температуре 400°C, в менее легированной плавке 13 продолжительность инкубационного периода при этих температурах составила 8 и 25 сек соответственно.

При повышении температуры нагрева с 860 до 1050°C устойчивость переохлажденного аустенита в перлитной области заметно повысилась у всех плавов, причем у стали плавки 11 с добавкой ниобия она оказалась несколько выше, чем у стали плавки 10 без ниобия, что указывает на более полное растворение карбидов ниобия и переход последнего в раствор при этой температуре аустенитизации. В бейнитной области эффект повышения устойчивости переохлажденного аустенита при повышении температуры аустенитизации снижается по мере понижения температуры изотермической выдержки.

При изучении твердости по сечению изотермически закаленных при температуре 280, 310 и 340°C образцов диаметром 25, 30 и 35 мм было установлено, что в плавках 10—12 сквозная прокаливаемость достигается на всех исследованных сечениях, тогда как в плавке 13 с минимальной степенью легирования разница в твердости, замеренной в центре прутка и на максимальном удалении от него, составила 3—4 единицы по RC.

Известно, что при наличии сильных гидридообразующих элементов (цирконий, ниобий и др.) флокеночувствительность стали уменьшается, поскольку образование флокенов связано с диффузионным перемещением водорода. Однако сравнение макроструктуры сталей плавов 10 без ниобия и 11 с добавкой ниобия показало, что ниобий в количестве 0,033% не оказывает заметного влияния на флокеночувствительность стали: количество флокенов и радиус их залегания в обеих плавках оказались примерно одинаковыми.

Исследование склонности к обезуглероживанию, проведенное на предварительно шлифованных образцах из стали 60С2 (плавка 1) и 60ХГСБ (плавки 10—13) после выдержки при температуре 1050°C в течение одного часа, показало, что наибольшую глубину обезуглероженного слоя имеет сталь 60С2, у которой толщина ферритного слоя, определяющая глубину полного обезуглероживания, составила 0,1—0,2 мм. В стали плавки 13 отсутствует слой с полным обезуглерожи-

ваннем, глубина частичного обезуглероживания составляет примерно 0,1 мм, в плавках же 10—12 обезуглероженный слой не был обнаружен.

Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства опытных сталей промышленных плавков

Механические свойства стали плавков 10—13 определяли после закалки в масле и отпуска в интервале температур 350—500°C, а также после изотермической закалки при температурах 280, 310 и 340°C без отпуска и с последующим отпуском при температуре 300—450°C через каждые 50°. Некоторые результаты этих исследований приведены в табл. 3.

После изотермической закалки пластические свойства опытных сталей оказались в 1,5—2 раза, а ударная вязкость в 2—3 раза выше, тогда как предел упругости примерно в 1,5—1,8 раза ниже, чем после обычной термообработки на ту же твердость. В менее легированной плавке 13 снижение предела упругости и повышение ударной вязкости после изотермической закалки происходит в меньшей степени, чем у остальных плавков. Модифицирование ниобием благоприятно влияет на ударную вязкость стали: после всех режимов термообработки ударная вязкость стали плавки 11 с добавкой ниобия оказалась выше, чем у плавки 10 без ниобия. Высокий комплекс прочностных и пластических свойств стали 60ХГСБ сохраняется при повышении температуры аустенитизации до 1050°C, поэтому пружины из этой стали можно закалывать с навивочного нагрева.

Исследование влияния температуры отпуска на механические свойства изотермически закаленной стали показало, что при температуре до 300—350°C отпуск не оказывает большого влияния на прочностные и пластические свойства, а также ударную вязкость, при дальнейшем повышении температуры отпуска наблюдается снижение как прочностных, так и пластических свойств. После отпуска при температуре 450°C ударная вязкость стали, закаленной изотермически и в масле, оказалась одинаковой. Дополнительный отпуск при всех исследованных температурах значительно повышает сопротивляемость малым пластическим деформациям изотермически закаленной стали. Так, после отпуска при температурах 300, 350 и 400°C предел упругости изотермически закаленной при температуре 310°C стали плавки 11 составил соответственно 80, 90 и 94 кг/мм². Магнитометрическое измерение позволило установить, что после изотермической закалки в структуре стали плавки 13 содержится 2—4% остаточного

Таблица 3

Влияние режимов термической обработки на механические свойства сталей промышленных плавков

Закалка	Температура отпуска или изотермическ. выдержки, °C	Плавка 10						Плавка 11						Плавка 13					
		HRC	σ_v , кг/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	δ_5 , %	ϕ , %	a_n , кг/мм ²	$\sigma_{0.005}$, кг/мм ²	HRC	σ_v , кг/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	δ_5 , %	ϕ , %	a_n , кг/мм ²	σ_v , кг/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	δ_5 , %	ϕ , %	a_n , кг/мм ²
Обычная	350	56	225	208	4,0	—	1,0	130	56	225	200	5,0	5,4	1,5	227	215	4,3	12,2	1,3
	400	53	199	167	4,0	—	1,9	122	53	203	182	7,5	11,0	2,8	193	179	7,0	19,0	2,5
	450	50	179	153	8,8	30,0	2,6	108	49	179	160	9,5	33,5	2,9	167	156	10,0	33,0	3,0
	500	46	158	142	10,3	31,5	3,0	92	46	163	145	11,3	35,5	3,5	146	133	11,3	38,0	3,1
Изотермическая	280	52	204	175	11,0	34,7	3,6	70	52	201	179	12,0	39,0	5,2	210	194	10,0	39,0	3,5
	310	50	182	166	11,4	42,5	4,5	56	50	182	159	12,9	46,0	6,8	190	171	10,0	44,0	3,7
	340	46	153	146	15,2	54,0	6,1	52	45	151	135	14,5	47,0	7,3	158	139	11,0	46,0	4,3

аустенита в зависимости от температуры изотермической выдержки, а в остальных плавках — 13—25%, что значительно больше, чем после обычной закалки и отпуска при всех исследованных температурах. После отпуска при температурах 300—350°C у изотермически обработанной стали наблюдается частичный распад остаточного аустенита, после же отпуска при температуре 450°C происходит практически полный его распад.

Проведенные исследования позволили заключить, что повышение содержания марганца в хромомарганцевокремнистой пружинной стали до 1,3% является нецелесообразным. Пластические свойства стали с таким содержанием марганца (плавка 12) оказались ниже, чем у остальных плавков как после обычной закалки с отпуском, так и после изотермической обработки. Вместе с тем повышение содержания марганца с 0,8 до 1,3% лишь незначительно повысило устойчивость переохлажденного аустенита, а требуемая прокаливаемость сталей исследованных составов достигается при содержании марганца 0,8%.

При изучении усталостной прочности было установлено, что изотермическая закалка обеспечивает значительно более высокий предел выносливости опытных сталей, чем обычная термообработка. Так, после закалки в масле и отпуска при температуре 420—450°C (RHC 50) предел выносливости стали плавков 10, 11 и 13 составил 63, 70 и 65 кГ/мм², тогда как после изотермической закалки на ту же твердость — 80, 85 и 90 кГ/мм² соответственно. Высокие значения циклической прочности стали после изотермической закалки ряд авторов объясняет повышенным содержанием остаточного аустенита. Однако благоприятное влияние остаточного аустенита на усталостную прочность стали может наблюдаться только в том случае, когда в процессе термической обработки происходит его стабилизация и упрочнение, вызванное выделением дисперсных карбидов. При вводе в сталь хрома, способствующего выделению дисперсных карбидов из обогащенных углеродом аустенитных участков в процессе изотермической выдержки, остаточный аустенит эффективно упрочняется. Поскольку повышение циклической прочности стали при наличии остаточного аустенита связано только с уменьшением ее чувствительности к внешним и внутренним концентраторам напряжений, то для пружин, изготовленных из стали высокой чистоты и не имеющих внешних концентраторов напряжений, необходимо добиваться более полного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с высказанными положениями. После изотермической закалки предел выносливости стали 60С2 оказался не выше, чем после

обычной термообработки на ту же твердость, тогда как у стали, дополнительно легированной хромом, наблюдается значительное повышение предела выносливости после изотермической закалки, причем сталь плавки 13, имеющая в структуре минимальное количество остаточного аустенита, при равной твердости имеет более высокое значение предела выносливости, чем остальные плавки.

Исследованием установлено благоприятное влияние модифицирования ниобием на усталостную прочность стали: предел выносливости стали с ниобием выше, чем без него на 7 кГ/мм² после обычной и 5 кГ/мм² после изотермической обработки. Изменение температуры изотермической выдержки в исследованных пределах, а также дополнительный отпуск при температуре до 350°C не оказывают большого влияния на усталостную прочность опытной стали.

Было изучено влияние высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), а также последующей перекристаллизации на свойства прочности и пластичности стали промышленных плавков. Применение ВТМО позволяет значительно повысить прочностные характеристики хромомарганцевокремнистой пружинной стали. Так, у стали плавки 11 предел прочности после ВТМО и отпуска при температуре 450°C выше на 30 кГ/мм², чем после закалки в масле и отпуска при той же температуре. Рентгенографические исследования показали, что повышение механических свойств стали после ВТМО происходит в результате изменений в тонкой структуре: во всех случаях у стали после ВТМО наблюдали увеличение ширины интерференционных линий (110) и (220). Однако повторная закалка при обычном печном нагреве (продолжительность выдержки при температуре аустенитизации 20 мин) полностью снимает эффект ВТМО.

Влияние химического состава и режимов термической обработки на эксплуатационные характеристики пружин

Характеристики пружин, изготовленных из опытной хромомарганцевокремнистой стали, а также стали 60С2 после различных режимов термической обработки представлены в табл. 4. Как видно из приведенных данных, наименьшую осадку после двукратного обжатия до соприкосновения витков показали пружины после обычной термообработки — закалка в масле с последующим отпуском при температуре 420°C, причем осадка в этом случае оказалась практически одинаковой у пружин из сталей 60С2 и 60ХГСБ. При повышении температуры изотермической выдержки осадка пружин после

двукратного обжатия увеличивается, дополнительный отпуск после изотермической закалки при всех исследованных температурах выдержки значительно снижает величину осадки.

После выдержки в течение 100 часов в сжатом до соприкосновения витков состоянии ($\tau = 7200$ кг/см²) осадка пружин, характеризующая их релаксационную стойкость, после изотермической закалки оказалась ниже, чем после обычной закалки с отпуском. Изменение химического состава стали 60ХГСБ в исследованных пределах, а также дополнительный отпуск после изотермической закалки не оказывают заметного влияния на релаксационную стойкость пружин.

Таблица 4

Влияние химического состава и режимов термической обработки на эксплуатационные характеристики пружин

Марка стали	Температура охлаждающей среды, °C	Температура отпуска, °C	HRC	Жесткость, кг/см	Осадка, мм		Число циклов до разрушения при $\tau = 7200$ кг/см ² , $\times 10^3$	
					после двукратного обжатия до соприкосновения витков	после выдержки 100 час. при $\tau = 7200$ кг/см ²	в шахтной воде	на воздухе
60C2	20	420	47—50	75	7—11	5,0	1,7	2,4
	20	420	47—49	74	7—10	5,0	1,5	—
60ХГСБ ^{III} (плавка 13)	300	—	48—50	73	20—23	2,5	—	—
		300	48—49	73	12—14	2,5	2,2	5,0*
	320	—	46—47	70	24—27	2,5	—	—
		300	46—47	70	16—18	2,0	2,8	5,0*
60ХГСБ ^I (плавка 11)	300	—	48—50	72	24—26	2,0	—	—
		300	48—50	72	17—19	2,0	1,8	5,0*
	320	—	46—47	69	30—32	2,5	—	—
		300	46—47	70	19—23	2,0	2,0	5,0*

Долговечность пружин из стали 60ХГСБ после закалки в масле с отпуском 420°C при испытании в шахтной воде оказалась несколько ниже, чем пружин из стали 60C2, обработанных по такому же режиму. Изотермически обработанные пружины из стали 60ХГСБ при испытании в шахтной воде пока-

* Пружины не разрушились.

зали более высокую долговечность, чем обработанные обычным способом пружины из этой стали и стали 60C2. Особенно заметное повышение долговечности пружин из разработанной стали после изотермической закалки по сравнению с пружинами из стали 60C2, обработанными по оптимальному режиму, обнаружено при испытании на воздухе. В первом случае все пружины проработали базовое число $5 \cdot 10^6$ циклов без разрушений, тогда как во втором — средняя долговечность пружин составила только $2,4 \cdot 10^6$ циклов, и ни одна из пружин не проработала базового числа циклов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Оптимальным режимом термической обработки пружин углеобогащающих машин, изготовленных из стали 60C2, является закалка в масле с последующим отпуском при температуре 400—450°C на твердость HRC 47—50.

2. Изотермическая закалка на требуемую для пружин твердость HRC 46—52 не обеспечивает повышение комплекса механических свойств стали 60C2 исследованного состава по сравнению с обычной термообработкой, сквозная прокаливаемость при изотермической закалке достигается на прутках диаметром не более 10—12 мм.

3. Высокие значения механических свойств, а также сквозную прокаливаемость при изотермической закалке в сечениях диаметром 30—35 мм имеет сталь, комплексно легированная хромом, марганцем и кремнием при содержании 1,0—1,3% каждого.

4. Установлен состав и разработан оптимальный режим термической обработки хромомарганцевокремнистой стали для крупных пружин углеобогащающих машин. Рекомендуемым составом стали является, %: углерод — 0,54—0,62; марганец — 0,8—1,0; кремний — 1,2—1,4; хром — 1,1—1,4; ниобий — до 0,03. Оптимальным режимом термической обработки пружин из разработанной стали является изотермическая закалка 290—310°C, 1 час, отпуск при 300—350°C, 1 час.

5. Содержание марганца в хромомарганцевокремнистой пружинной стали не должно превышать 1,0%, при более высоком его содержании снижается общий комплекс механических свойств как после обычной, так и после изотермической обработки.

6. Модифицирование стали ниобием в количестве 0,02—0,03% несколько понижает устойчивость переохлажденного аустенита при обычной (860°C) и повышает при повышенной (1050°C) температуре нагрева под закалку. Добавка ниобия повышает предел выносливости стали на 5—7 кг/мм² и удар-

ную вязкость на 1—3 кГм/см², при указанном содержании ниобий не оказывает заметного влияния на флокеночувствительность стали.

7. Изотермическая закалка разработанной хромомарганцевокремнистой стали обеспечивает при равной твердости повышение ударной вязкости в 2—3 раза, пластических свойств — в 1,5—2 раза, предела выносливости — на 15—20%, релаксационной стойкости пружин — в 2—2,5 раза по сравнению с обычной термообработкой.

8. Предел упругости стали после изотермической закалки в 1,5—1,8 раза ниже, а осадка пружин в результате двукратного обжатия — в 2—3 раза выше по сравнению с обычной термообработкой на ту же твердость. Дополнительный отпуск при температуре 300—350°C, не оказывая заметного влияния на пределы прочности и выносливости, а также ударную вязкость, пластические свойства и релаксационную стойкость стали, значительно повышает предел упругости и снижает осадку пружин после двукратного обжатия, обеспечивая практически такие же значения этих характеристик, как и после обычной термообработки.

9. После оптимального режима термообработки разработанная сталь обеспечивает повышение предела прочности на 5 кГ/мм², относительного удлинения на 2—3%, относительного сужения на 9—10%, ударной вязкости на 2—3 кГм/см², предела выносливости на 13 кГ/мм², релаксационной стойкости и долговечности пружин не менее, чем в 2 раза по сравнению с применяемой в настоящее время для пружин углеобогащенных машин сталью 60С2.

10. Высокий комплекс прочностных и пластических свойств разработанной стали сохраняется при повышении температуры аустенитизации до 1050°C, что позволяет рекомендовать закалку пружин из этой стали с навивочного нагрева.

11. Разработанная хромомарганцевокремнистая сталь обладает пониженной по сравнению со сталью 60С2 склонностью к обезуглероживанию: полностью обезуглероженный слой отсутствует у разработанной стали как при обычной (860°C), так и при повышенной (1050°C) температуре нагрева под закалку с выдержкой 1 час.

12. Применение пружин из разработанной марки стали и установленного режима термической обработки только на заводе угольного машиностроения имени Пархоменко (г. Ворошиловград) обеспечит экономию в народном хозяйстве не менее 140000 руб. в год при работе пружин в отсутствии агрессивной среды (шахтной воды) и 39200 руб в год при наличии агрессивной среды.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. В. А. Харченко, В. П. Гашутин, А. Ф. Котухов, В. Ф. Блескун, В. И. Хотина, И. Ю. Домбровская. Влияние микролегирования сильными карбидообразующими элементами на свойства сталей. Сб. Научно-исследовательские работы в области металлургической промышленности. Материалы научно-технической конференции ДПИ, Донецк, 1970.

2. В. А. Харченко, В. Ф. Блескун. Упрощенный метод определения предела упругости. Сб. Научно-исследовательские работы в области металлургической промышленности. Материалы научно-технической конференции ДПИ, Донецк, 1970.

3. В. А. Харченко, А. Л. Симонов, В. Ф. Блескун, Н. С. Гальченко, Н. М. Дербасов, В. П. Харченко. О возможности повышения работоспособности витых пружин углеобогащенных машин из стали 60С2 изотермической закалкой. Сб. Сообщения о законченных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работах института «Гипромашуглеобогащение», Ворошиловград, 1971.

4. В. А. Харченко, А. Л. Симонов, В. Ф. Блескун, Н. С. Гальченко, Н. В. Корнеев, Н. М. Дербасов, В. П. Харченко. Исследование влияния некоторых факторов на усталостную прочность стали 60С2 с целью повышения долговечности пружин углеобогащенных машин. Сб. Сообщения о законченных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работах института «Гипромашуглеобогащение», Ворошиловград, 1971.

5. В. А. Харченко, А. Л. Симонов, В. Ф. Блескун, Н. С. Гальченко, Н. М. Дербасов, В. П. Харченко. Выбор оптимального режима термической обработки стали 60С2 для пружин углеобогащенных машин. Сб. Сообщения о законченных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работах института «Гипромашуглеобогащение», Ворошиловград, 1971.

6. В. А. Харченко, А. Л. Симонов, В. Ф. Блескун, Н. С. Гальченко, Н. В. Корнеев, Б. А. Корель, Н. М. Дербасов, В. П. Харченко. Исследование составов сталей и режимов их термической обработки для крупных пружин углеобогащенных машин. Сб. Сообщения о законченных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работах института «Гипромашуглеобогащение», Ворошиловград, 1971.

7. В. А. Харченко, В. Ф. Блескун. Упрочнение пружинной стали изотермической закалкой. Технология и организация производства, № 4, Киев, 1971.

Ответственный за выпуск доц. канд. техн. наук Н. В. Губенко.

БП 03880. Подписано к печати 14.9.71 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Объем 1,25 печ. листа. Заказ 3956. Тираж 120.

Донецкая городская типография № 3 Артемовская 55.