

Министерство речного флота РСФСР

Горьковский институт инженеров водного транспорта

На правах рукописи

Авдентов Лев Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУСПОКОЙНЫХ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В СВЯЗИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИХ В СУДОСТРОЕНИИ

Специальность № 01.02.03 — сопротивление
материалов и строительная механика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Горький
1975

Диссертационная работа выполнена в Горьковском институте инженеров водного транспорта и Горьковской научно-исследовательской лаборатории испытания материалов МРФ.

Научный руководитель — профессор,
доктор технических наук **М. И. Волский.**

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор **Е. И. Астров.**

2. Кандидат технических наук, доцент **Д. И. Шетулов.**

Ведущее предприятие — судостроительный завод «Красное Сормово».

Автореферат разослан 10 сентября 1975 г.

Защита диссертации состоится 24 октября 1975 г.

в час. на заседании Совета по присуждению ученых степеней кораблестроительного и механического факультетов Горьковского института инженеров водного транспорта.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на реферат просим выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 603005, г. Горький, ул. Минина, д. 7, ГИИВТ, ученому секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета

доцент, к. т. н.



Н. И. Куликов.

Неуклонный рост промышленного производства находится в прямой зависимости от количества производимого проката черных металлов. Поэтому в решениях партии поставлена задача повышения эффективности металлургического производства путем сокращения потерь металла на пути от слитка к готовому прокату и внедрения прогрессивных способов производства металла.

Производство полуспокойной стали вместо спокойной является самым эффективным и технически подготовленным мероприятием, позволяющим увеличить производство стали без капитальных затрат и ресурс металлопроката. Объем ее выплавки в 1970 году составил 11 млн. т., а в 1975 году будет доведен до 20 млн. т. Экономический эффект при этом составит 50 млн. руб. в год. Народное хозяйство получит дополнительно более 1 млн. т. металлопроката.

При производстве углеродистых и низколегированных полуспокойных сталей вместо спокойных увеличивается выход годного проката из слитков на 8—10%, снижается в 2—5 раз расход раскислителей и др. Поэтому себестоимость и цена проката из полуспокойных сталей на 2—9 руб. на тонну ниже, чем из спокойных.

В настоящее время освоена технология производства 30 марок полуспокойной стали с содержанием $C=0,05-0,9\%$ и $Mn=0,25-1,7\%$, в том числе с микрелегированием ванадием и азотом на 17 металлургических заводах СССР.

Полуспокойные стали, которые по комплексу физико-механических и служебных свойств равноценны или превосходят спокойные того же класса прочности, отвечают требованиям технического прогресса по улучшению качества металлопродукции и повышению надежности сварных конструкций.

Судостроение является крупным потребителем металлопроката, а увеличение габаритов и грузоподъемности судов требует все большего применения низколегированных сталей.

Диссертационная работа написана автором на основании исследований, проведенных в Горьковском институте инженеров водного транспорта и Горьковской НИЛИМ МРФ в период с 1967—1974 гг. Цель работы — способствовать решению вопроса о применении полуспокойных низколегированных сталей в судостроении.

Исследованию подвергались разработанные Институтом черной металлургии (г. Днепропетровск) МЧМ СССР полуспокойные стали: с повышенным содержанием марганца 18Гпс (ЧМТУ 1-47-67); сталь 18ГФпс микрелегированная ванадием (ЧМТУ 1-727-69); марганцеванадиевая с нитридным упрочнением сталь 18Г2АФпс (ЧМТУ 1-741-69).

Исследование произведено параллельно с ведущими институтами отраслей потребления: ЦНИИСК, НИИЖБ, ВИСХОМ, ИЭС им. Е. О. Патона, ЦНИИТМАШ и др. Указанные стали МЧМ СССР рекомендовано применять взамен спокойных сталей Ст.Зсп, 09Г2, 10ХСНД соответственно. Эти рекомендации в 1971 г. одобрены Государственным Комитетом Совета Министров СССР по науке и технике в качестве обязательных для всех министерств и ведомств, потребляющих металлопрокат.

В основу исследования положена оценка полуспокойных сталей по физико-механическим свойствам, стойкости в сварных соединениях при переменных напряжениях и сопротивляемости сталей хрупким разрушениям.

В работе представлены 6 глав.

В I главе дана общая информация о разработке, свойствах, областях и перспективах применения низколегированных полуспокойных сталей. Проанализированы результаты исследований ЦНИИСКА стали 18Гпс, содержание РТМ других отраслей потребления проката, применяющих полуспокойные стали. Приведена информация о производстве и применении в судостроении полуспокойной стали за рубежом. Обоснована необходимость применения полуспокойной низколегированной стали в судостроении.

Во II главе дано описание физико-механических свойств сталей. Исследовался листовой прокат толщиной 8, 12, 20 мм Коммунарского металлургического завода — одного из основных поставщиков стали для судостроения. С завода было получено 29 листов стали марок Ст.Зсп (две плавки), Ст.Зпс, Ст.Зкп (химически заупоренная), Ст.ЗГпс (18Гпс), 18ГФпс, (18Г2пс, 18Г2Фпс оценивались предварительно) и 18Г2АФпс (две плавки). Углеродистые стали различной степени раскисленности были отобраны из валовых плавов завода. Температура конца прокатки по данным сертификатов составляла: для листов толщиной 8 мм — $860 \pm 880^\circ\text{C}$, 12 мм — $880 \pm 1000^\circ\text{C}$, 20 мм — $1000 \pm 1050^\circ\text{C}$. Сталь 18Г2АФпс подвергалась нормализации в проходной роликовой печи с нагревом до температуры $940\text{—}950^\circ\text{C}$ с выдержкой полторы минуты на каждый 1 мм толщины проката и последующим охлаждением под вентилятором.

Листы сталей Ст.Зсп (о. р.) и Ст.ЗГпс были прокатаны из головной части слитка, места повышенной концентрации пороков при разливке стали. Листы других сталей прокатаны из слябов от средних $\frac{2}{5}$ частей слитка, исключая головную и донную части.

Полуспокойная низколегированная сталь с повышенным содержанием марганца 18Гпс поставлялась для исследования по временным ЧМТУ 1-47-67. С 1 января 1972 г. эта сталь внесена в ГОСТ 380-71 под маркой Ст.ЗГпс. Техническими условиями и ГОСТом 380-71 предусмотрен химический состав новой стали: 0,14—0,22% С, 0,8—1,1% Мп, менее 0,15% Si. Исследованная плавка стали Ст.ЗГпс содержала 0,23—0,24% С, 1,19—1,27% Мп, 0,03—0,05% Si, содер-

жание вредных и остаточных примесей соответствовало норме. Содержание С и Мп на максимальном уровне ставит исследованный металл в жесткие условия по свариваемости и хладостойкости. Изучение свойств стали Ст.ЗГпс произведено в сопоставлении со сталью Ст.З спокойной, полуспокойной и кипящей (химически заупоренной—х. з.). Сталь ВСт.Зсп (две плавки) раскислялась как обычным (0,4 кг/т—о. р.), так и повышенным (1 кг/т—п. р.) количеством Al.

Химический состав стали Ст.З (сп.—о. р., сп.—п. р., пс и кп—х. з.) установлен в границах норм ГОСТа 380-71 для аналогичных по степени раскисленности марок стали группы В: 0,17—0,22% С, 0,40—0,59% Мп. Спокойная сталь Ст.Зсп (п. р.) имеет содержание Мп ближе к нижнему пределу (0,43—0,48%), а Ст.Зсп (о. р.) — ближе к верхнему пределу нормы (0,53—0,59%). Для полуспокойной стали Ст.Зпс (лист 20 мм) содержание углерода 0,17% и кремния 0,06—0,07% минимальное, что определило прочностные свойства проката стали Ст.Зпс ниже нормы.

Полуспокойная сталь 18ГФпс повышенной прочности (ЧМТУ 1-727-69) в отличие от базовой стали 18Гпс микролегировалась ванадием. Опытная плавка стали 18ГФпс (0,19—0,22% С, 0,98—1,21% Мп, 0,09—0,12% Si, 0,03—0,06% V, примесей S, P, Cr, Cu—в норме) имеет химический состав в пределах, установленных ТУ (0,14—0,22% С, 0,8—1,2% Мп, 0,05—0,10% V).

Полуспокойная низколегированная с нитридным упрочнением сталь 18Г2АФпс повышенной прочности по ЧМТУ 1-741-69 должна иметь химсостав: 0,14—0,22% С, 1,2—1,7% Мп, Si $\leq$ 0,15%, 0,08—0,15% V, 0,015—0,030% N. Исследовались две плавки стали 4213 и 1814. Содержание элементов в стали установлено в пределах нормы. (N—по ковшовой пробе). При содержании углерода, близком к максимальному (0,19—0,23%), а марганца—к среднемарочному (1,41—1,56%), плавки отличались содержанием микролегирующих элементов: пл. 1814 имеет содержание ванадия, близкое к максимальному (0,12—0,14%), а азота—минимальное (0,015%), а пл. 4213 имеет среднее содержание азота и ванадия.

Для корпусных сталей, поставляемых с гарантией свариваемости и хладостойкости, ограничивается содержание углерода (0,20—0,22%), отрицательно влияющего на свариваемость, при этом повышение прочностных свойств и хладостойкости достигается увеличением содержания марганца. Для обеспечения этих гарантий отношение Мп/С рекомендовано не менее 3—5, а для сталей повышенного качества—до 8. Марганец, помимо упрочняющего эффекта, обеспечивает снижение критической температуры хрупкости на 4,5—6,0 град. на каждую 0,01% Мп взамен 0,01% С в основном за счет измельчения действительного зерна стали. Кроме того, марганец в количестве до 1,3—1,4% при 0,2% углерода не влияет на свариваемость стали. При сварке стали с повышенным содержанием марган-

ца он положительно влияет на хладостойкость околошовной зоны и нейтрализует вредное влияние азота в стали.

В зарубежном судостроении по нормам классификационных обществ для корпусов судов морского плавания полуспокойная углеродистая сталь применяется толщиной до 13 мм, а для проката больших толщин—большой частью полуспокойная сталь с $M_{п} = 0,8—1,0\%$ (при $\frac{M_{п}}{C} \geq 2,5$). Полуспокойные стали категорий повышенной прочности обычно содержат $C \leq 0,20 \div 0,21\%$, $M_{п} = 0,60 \div 1,40\%$ при показателе свариваемости $C + \frac{M_{п}}{6} \leq 0,40\%$ —категории «КД» (Япония), «ЕС» (Франция), «NVD» (Норвегия), «В» (США).

Регистр Союза ССР разрешает применение полуспокойной стали толщиной до 15,5 мм для ответственных связей корпуса только по согласованию с Регистром.

Показатель $\frac{M_{п}}{C}$ для Ст.3 (сп.—о. р., сп—п. р., пс, кп—х. з.) для листов 8, 12, 20 мм получен в пределах 2,0—3,1, а для стали Ст.3Гпс—4,6—5,3, для стали 18ГФпс—4,9—5,8, для стали 18Г2АФпс—6,5—7,5.

Показатель $C + \frac{M_{п}}{6} \leq 0,40$ подсчитан для плавок исследованных сталей: $0,236 \div 0,308\%$ для стали Ст.3 различного раскисления, а для остальных— $0,363 \div 0,49\%$.

2. Нормы механических свойств полуспокойной стали 18Гпс (Ст.3Гпс) регламентированы ЧМТУ 1-47-67 и ГОСТом 380-71 и соответствуют нормам для стали Ст.3сп и Ст.3пс. Однако сталь Ст.3пс только в листовом и фасонном прокате толщиной до 10 мм равноценна спокойной стали по хладостойкости. Сталь Ст.18Гпс в отличие от Ст.3пс в прокате толщиной ≥ 10 мм по всем физико-механическим свойствам превосходит спокойную сталь Ст.3сп. Кроме того, эта сталь (группы Б, В) поставляется с гарантией свариваемости. Область применения стали 18Гпс (Ст.3Гпс) определена в решениях Всесоюзного семинара «Состояние и перспективы применения полуспокойной стали» (1969 г.): «... сталь 18Гпс надлежит применять взамен спокойной стали Ст.3сп в прокате любых толщин, преимущественно более 10 мм». В настоящее время рекомендовано использовать полуспокойную сталь Ст.3Гпс наравне со спокойной Ст.3сп без ограничений по температуре эксплуатации, изготовления и монтажа сварных конструкций и виду испытываемых нагрузок Госстроем СССР, министерствами тяжелого энергетического и транспортного машиностроения (РТМ 24.911.01), химического и

нефтяного машиностроения (ОСТ 291-71), тракторного и сельскохозяйственного машиностроения (РТМ 23.2.3-70). Госгортехнадзором СССР сталь 18Гпс разрешено использовать для особо ответственных сварных конструкций и изделий: аппаратов и сосудов, работающих под давлением, и кранов. В судостроении полуспокойная сталь применяется пока в незначительном количестве. Применение стали ВСт.3пс (толщиной 5—10 мм) допускается на основании ГОСТа 5521-67, исключая ее использование для изготовления корпусов и конструкций судов класса М и М-СП и судов, предназначенных для плавания в ледовых условиях. Спокойная малоуглеродистая сталь ВСт.3сп4 (толщиной 5—20 мм) по ГОСТу 380-71, а также низколегированная сталь марок 09Г2, 10Г2С1Д (МК-35 и МК-40) и 10ХСНД (СХЛ-4) (ГОСТ 5521-67) применяется для корпусов всех типов судов (бюллетень № 15 Речного Регистра РСФСР, 1973). Применение полуспокойной стали Ст.3Гпс наряду со спокойной Ст.3сп там, где невозможно применить сталь Ст.3пс (в основном прокат толщиной ≥ 10 мм) и низколегированных полуспокойных сталей взамен указанных спокойных (ГОСТ 5058-65), позволит снизить дефицит судокорпусной стали при снижении цены проката. В настоящее время ГОСТ 5521-67 на судостроительную сталь, ссылаясь на отмененный ГОСТ 380-60, не учитывает возможности использования полуспокойной стали Ст.3Гпс, которая производится по новому ГОСТу 380-71. Внесение этой стали в ГОСТ 5521 расширило бы область применения полуспокойной стали в судостроении.

Стали Ст.3 (сп.—о. р., сп—п. р., пс и кп—х. з.—листы 8, 12, 20 мм), исследованные автором, по механическим свойствам в основном соответствовали нормам ГОСТа 380-71, а полуспокойная сталь Ст.3Гпс удовлетворяла требованиям с запасом: $\sigma_b \geq 38$, $\sigma_t \geq 25$ (≥ 24 для кп) кгс/мм², $\delta_5 \geq 26\%$.

Сталь 18ГФпс повышенной прочности (горячекатаная, листы 8, 12, 20 мм) надежно обеспечивает установленные ТУ характеристики: $\sigma_t \geq 31$, $\sigma_b \geq 45$ кгс/мм² при $\delta_5 \geq 21\%$, что позволяет применить ее взамен горячекатаной стали 09Г2 (4—20 мм), а, возможно, и стали 10Г2С1Д-35 (4—16 мм).

Полуспокойная сталь 18Г2АФпс (нормализованная) в прокате тех же толщин имела характеристики прочности выше нормы ТУ: $\sigma_t \geq 40$, $\sigma_b \geq 55$ кгс/мм², $\delta_5 \geq 18\%$ и может заменить спокойную низколегированную сталь 10ХСНД (горячекатаную—4—14 мм и термически обработанную—16—32 мм).

4. Деформационная способность сталей определялась при испытании на загиб узкой пробы (ГОСТ 14079-68) вокруг оправки толщиной $c = 0,5\delta$ (где δ —толщина проката) для малоуглеродистых сталей и $c = 2\delta$ —для низколегированных сталей и при испытании широкой судостроительной пробы. Загиб на $< 180^\circ$ (узкая проба) не выдержала только сталь Ст.3сп (о. р.).

5. Микроструктура всех листов исследованных сталей в состоянии поставки рассматривалась при помощи светового микроскопа при увеличении $\times 100$ на шлифах, вырезанных в 150 мм от оси листа на всю толщину проката. Структура листов толщиной 8 мм стали Ст.3 (сп.—о. р., сп.—п. р., пс, кп—х. з.) мелкозернистая, феррито-перлитовая, зерно феррита 7—8 баллов (ГОСТ 5639-65), а для стали Ст.3Гпс более дисперсная, зерно феррита—балл 8. Для листов 12 мм—балл зерна феррита 6—7, а для 20 мм—балл 5 (для стали Ст.3Гпс балл 5—6). Сталь 18ГФпс по структуре и размеру зерна близка к стали Ст.3Гпс. Сталь 18Г2АФпс имела мелкозернистую структуру, состоящую из феррита и очень дисперсного перлита (зерно феррита балл 8—10) для листов толщиной 8, 12, 20 мм. Для листов всех трех толщин стали 18Г2АФпс отмечена высокая однородность по толщине проката, что подтверждается замером твердости (HR_B для центрального слоя 83—85 ед., а для краевых участков—85—88 ед.—лист 20 мм).

Одной из важнейших служебных характеристик металла является сопротивляемость сварных соединений действию переменных нагрузок.

Глава III содержит результаты экспериментальных исследований сталей (для сопоставления по выносливости) на прочность при переменных напряжениях на образцах в виде сварных крупногабаритных балочных элементов. Испытанию подвергались балки двутаврового профиля (листы 8, 12 мм) и таврового (листы 20 мм) длиной 800 мм с номинальным моментом сопротивления $W_x = 100 \pm \pm 2 \text{ см}^3$ (эскизы балок см. на рис. № 1, 2). Полосы-заготовки после вырезки из листов сваривались автоматом на режимах: двутавровый профиль при $I_{св} = 580\text{—}600 \text{ А}$, $U_d = 35 \text{ В}$, $V_{св} = 32,5 \text{ м/час}$ проволокой СВ 08А $\varnothing 3 \text{ мм}$ под марганцовистым флюсом ОСЦ—45, а тавровый— $I_{св} = 800 \text{ А}$, $U_d = 36 \text{ В}$, $V_{св} = 22 \text{ м/час}$ проволокой СВ 0,8А $\varnothing 4 \text{ мм}$. На нижний пояс всех балок наваривались накладки $60 \times 8 \text{ мм}$ двумя лобовыми швами (имитация узлового стыка крепления к несущему элементу). Для получения высокого качества ответственных швов наплавку производили с выводом на планки. Выполнение швов обрезаемыми исключало концевые дефекты в пределах полки. При автоматическом выполнении контрольных швов на режиме $I_{св} = 580\text{—}600 \text{ А}$, $U_d = 34 \text{ В}$, $V_{св} = 28 \text{ м/час}$ соотношение катетов швов получалось примерно $1:1,5 \div 1,6$.

Испытание балок производилось при знакопостоянном изгибе по двухопорной схеме с нагружением в середине пролета при коэффициенте асимметрии цикла $\rho = 0,2 \pm 0,025$ (подсчитан по осциллограммам 50 балок) на гидравлических пульсаторных машинах одностороннего действия ГРМ-1 и ЗД—100—ни с $f = 9,8 \div 10 \text{ Г}$.

Испытание на выносливость производилось по методике, обоснованной в работах В. И. Труфякова, С. В. Серенсена и др. Использо-

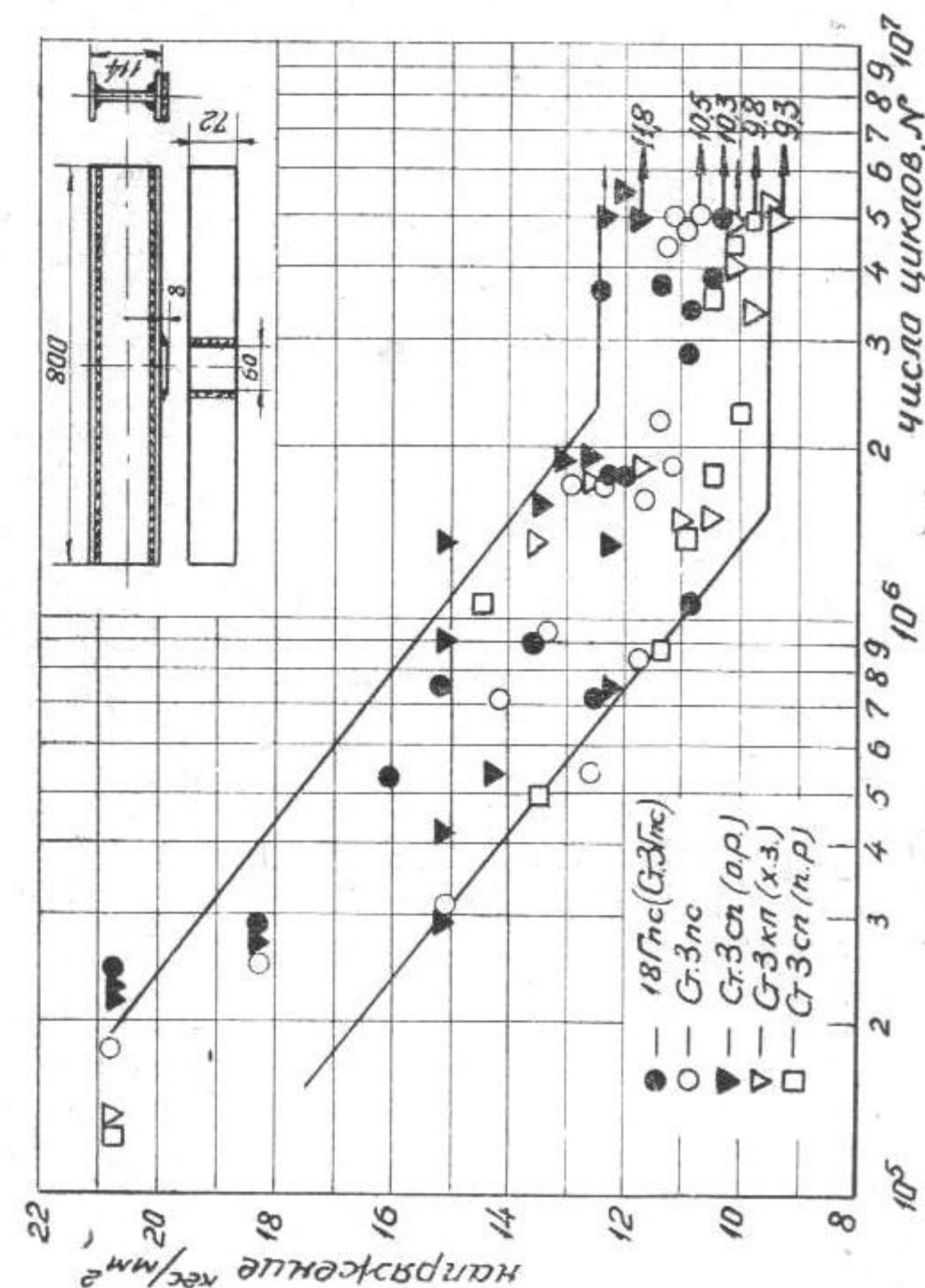


Рис. 1. Выносливость сварных образцов-балок с поперечными угловыми швами из стали Ст.3 различной степени раскисленности и 18Гпс (лист толщиной 12 мм) при асимметричном цикле напряжений ($\rho = 0,2$)

вался критерий разрушения (трещина критической глубины 3—4 мм), который отражает реальные условия работы, т. к. разрушения сварных конструкций происходят хрупко при наличии отрицательных температур, и напряжений ниже предела текучести уже при вибрационной трещине 3—4 мм. Кривые выносливости, построенные по этому критерию, располагаются ниже, чем по моменту полного разрушения. Корректировка расчетного числа циклов n_p по принятому критерию производилась по формуле

$$n_p = n_0 + \frac{n_k - n_0}{h_{тр}} \cdot 4,$$

где n_k — число циклов в момент остановки испытания при глубине трещины $h_{тр}$, мм;
 n_0 — число циклов изменения нагрузки к моменту зарождения трещины; 4 мм — критическая глубина трещины.

Учитывая, что перелом кривых выносливости для различных типов сварных соединений происходит в интервале 1,5—3,5 млн. циклов, база испытаний принята $5 \cdot 10^6$ циклов.

Для проката стали одной толщины и марки испытывалась серия балок 12—20 штук. Всего исследовано 28 партий балок в количестве 452 штук. Номинальные напряжения в опасном сечении элементов задавались теоретически в пределах от 21,8 ($18,2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ до предела выносливости). Кривые выносливости строились в координатах $\sigma_{\text{теор}}^{\text{max}} - \lg N$.

Результаты сравнительных испытаний сталей на выносливость (Автоматическая сварка)

1. Результаты испытаний сварных крупногабаритных балок двутаврового профиля из стали Ст.3сп (п.р.), Ст.3пс и Ст.3кп (х.з.) в листовом прокате 8 мм лежат в одной области рассеяния по долговечности, а для стали Ст.3сп (о.р.) располагаются выше этой области.

Для стали Ст.3Гпс (лист 8 мм) результаты испытаний располагаются на верхней границе доверительного интервала стали Ст.3сп (о.р.) и в отличие от стали Ст.3сп (о.р.) — без выпадов в границы общего интервала сталей Ст.3сп (п.р.), Ст.3пс, Ст.3кп (х.з.).

2. Результаты испытаний балок двутаврового профиля с тем же моментом сопротивления из сталей Ст.3сп (п.р.), Ст.3пс, Ст.3кп (х.з.), Ст.3сп (о.р.) и Ст.3Гпс (листы 12 мм) одинаковы по взаимному расположению в общей области с данными для листа толщи-

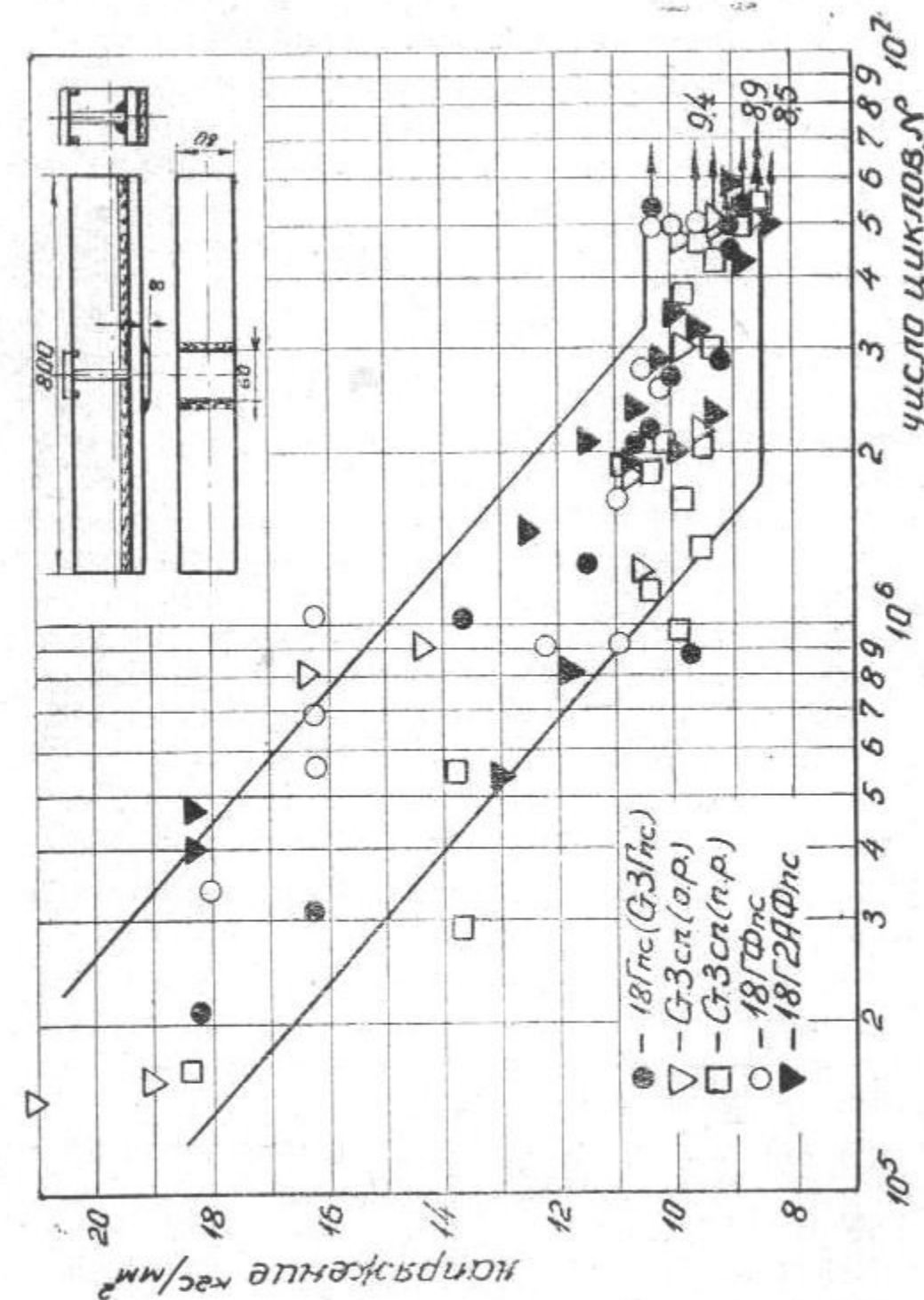


Рис. 2. Выносливость сварных образцов-балок с поперечными угловыми швами из стали марок 18Гпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс и углеродистой спокойной стали (лист толщиной 20 мм) при асимметричном цикле напряжений ($p = 0,2$)

ной 8 мм. Линия выносливости для стали Ст.3Гпс располагается на верхней границе общего доверительного интервала указанных сталей без выпадов за пределы интервала стали Ст.3сп (п. р.). При этом ни один результат испытания для сталей Ст.3пс и Ст.3кп (х. з.) не выходит за границы интервала сталей Ст.3сп (о. р.), Ст.3сп (п. р.).

3. Результаты испытаний балок таврового профиля из сталей Ст.3сп (о. р.), Ст.3пс, Ст.3кп, Ст.3Гпс (листы 20 мм) расположены в одном и том же доверительном интервале более узком, чем для проката толщиной 8, 12 мм, что связано с увеличением влияния толщины проката (масштабный фактор) на выносливость образцов. Результаты испытаний для стали Ст.3сп (п. р.) расположены на нижней границе указанного интервала.

4. Полуспокойная сталь 18ГФпс по вибрационной стойкости в листовом прокате толщиной 8, 12, 20 мм одинакова со сталью Ст.3сп (п. р.) — листы 8 мм и со сталью Ст.3Гпс и Ст.3сп (о. р.) — листы 12 мм. Результаты испытаний стали 18ГФпс расположены в доверительном интервале стали Ст.3Гпс — листы 12 и 20 мм.

5. Полуспокойная сталь 18Г2АФпс имеет вибрационную стойкость, равноценную стали Ст.3сп (о. р.) (листы 8 мм), левая ветвь кривой выносливости, полученная как средняя линия доверительного интервала рассеяния результатов испытаний (включает 80—90% точек), несколько ниже у стали 18Г2АФпс, но все результаты расположены выше интервала для стали Ст.3сп (п. р.). В листовом прокате 12 и 20 мм линии выносливости и области рассеяния результатов испытаний для стали 18Г2АФпс и Ст.3сп (о. р.), Ст.3Гпс, 18ГФпс совпадают и расположены выше, чем для стали Ст.3сп (п. р.).

Пределы выносливости $\sigma_{+0,2}$ сталей Ст.3 (сп—о. р., сп—п. р., кп—х. з.), Ст.3Гпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс (2-х плавов) практически равноценны в прокате одинаковой толщины (см. табл. 1).

Некоторое различие в $\sigma_{+0,2}$ объясняется высокой чувствительностью лобовых швов, ответственных за прочность к состоянию и форме необработанной переходной поверхности от шва к основному металлу, где возникали трещины во всех образцах.

В главе IV представлены результаты исследования выносливости сварных балочных элементов из стали Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс при ручной сварке в сравнении с автоматической, а также стали 18Г2АФпс (двух плавов) при автоматической сварке. С увеличением толщины проката ухудшаются свойства стали, что влияет на ее свариваемость и вибрационную стойкость. Поэтому для сравнения сталей Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс при ручной и автоматической сварке использован прокат 20 мм.

Результаты исследований стали 18Г2АФпс (2-х плавов) указаны в главе III реферата.

$$\text{Пределы выносливости } \sigma_{+0,2} \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \left(\times 10 \frac{\text{МН}}{\text{М}^2} \right)$$

(автоматическая сварка)

Марка стали Толщина проката, мм	Ст.3сп (п.р.)	Ст.3сп (о.р.)	Ст.3пс	Ст.3кп (х.з.)	Ст.3Гпс (18Гпс)	18ГФпс	18Г2АФпс (п.л. 1814)	18Г2АФпс (п.л. 4213)
8	11,9	11,8	11,3	10,2	12,5	9,9	11,2	11,7
12	9,7	11,8	10,5	9,3	10,0	11,3	10,3	11,8
20	8,9	9,3	11,4	9,6	8,8	9,4	8,5	

Для ручной сварки применялся электрод УОНИ 13/45А типа Э42А-Ф (ГОСТ 9467-60) с фтористо-кальциевым покрытием, широко применяемый в судостроении для сварки низколегированных и высокопрочных сталей с $\sigma_t \leq 45$ кгс/мм² и электроды АНО-4 и МР-3 типа Э46-Т с рутил-карбонатным покрытием, внедряемые в судостроение. Для оценки свойств сварного соединения проверялся химсостав наплавленного металла для стали Ст.3сп (п. р.) и 18Гпс. Содержание углерода для стали Ст.3сп и Ст.3Гпс установлено одинаковым при сварке каждым электродом на верхнем уровне норм ГОСТа 9467-70—0,11—0,14%, а содержание марганца—0,50—0,65% (УОНИ 13/45А), 0,5—0,9% (АНО-4, МР-3), что в пределах норм. Для стали Ст.3Гпс содержание марганца больше, чем для стали Ст.3сп на 0,02% (УОНИ 13/45А), на 0,22% — (АНО-4), на 0,09% — (МР-3). Для листового проката 20 мм из стали Ст.3сп и Ст.3Гпс (18Гпс) испытывались 3 серии балок (по 11—15 шт. в каждой). Сварка производилась вручную на стандартном режиме ($I_{св}=200—210$ А, $U_d=25$ В, скорость сварки была примерно одинаковой) электродами 3-х марок (ГОСТ 9466-60). Для каждой стали испытано по 32—41 балки.

1) При сварке ответственных за прочность (вибростойкость) швов электродом УОНИ 13/45А результаты испытаний стали Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс (18Гпс) принадлежат одной и той же области рассеяния.

ной 8 мм. Линия выносливости для стали Ст.3Гпс располагается на верхней границе общего доверительного интервала указанных сталей без выпадов за пределы интервала стали Ст.3сп (п. р.). При этом ни один результат испытания для сталей Ст.3пс и Ст.3кп (х. з.) не выходит за границы интервала сталей Ст.3сп (о. р.), Ст.3сп (п. р.).

3. Результаты испытаний балок таврового профиля из сталей Ст.3сп (о. р.), Ст.3пс, Ст.3кп, Ст.3Гпс (листы 20 мм) расположены в одном и том же доверительном интервале более узком, чем для проката толщиной 8, 12 мм, что связано с увеличением влияния толщины проката (масштабный фактор) на выносливость образцов. Результаты испытаний для стали Ст.3сп (п. р.) расположены на нижней границе указанного интервала.

4. Полуспокойная сталь 18ГФпс по вибрационной стойкости в листовом прокате толщиной 8, 12, 20 мм одинакова со сталью Ст.3сп (п. р.) — листы 8 мм и со сталью Ст.3Гпс и Ст.3сп (о. р.) — листы 12 мм. Результаты испытаний стали 18ГФпс расположены в доверительном интервале стали Ст.3Гпс — листы 12 и 20 мм.

5. Полуспокойная сталь 18Г2АФпс имеет вибрационную стойкость, равноценную стали Ст.3сп (о. р.) (листы 8 мм), левая ветвь кривой выносливости, полученная как средняя линия доверительного интервала рассеяния результатов испытаний (включает 80—90% точек), несколько ниже у стали 18Г2АФпс, но все результаты расположены выше интервала для стали Ст.3сп (п. р.). В листовом прокате 12 и 20 мм линии выносливости и области рассеяния результатов испытаний для стали 18Г2АФпс и Ст.3сп (о. р.), Ст.3Гпс, 18ГФпс совпадают и расположены выше, чем для стали Ст.3сп (п. р.).

Пределы выносливости $\sigma_{+0,2}$ сталей Ст.3 (сп—о. р., сп—п. р., кп—х. з.), Ст.3Гпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс (2-х плавок) практически равноценны в прокате одинаковой толщины (см. табл. 1).

Некоторое различие в $\sigma_{+0,2}$ объясняется высокой чувствительностью лобовых швов, ответственных за прочность к состоянию и форме необработанной переходной поверхности от шва к основному металлу, где возникали трещины во всех образцах.

В главе IV представлены результаты исследования выносливости сварных балочных элементов из стали Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс при ручной сварке в сравнении с автоматической, а также стали 18Г2АФпс (двух плавок) при автоматической сварке. С увеличением толщины проката ухудшаются свойства стали, что влияет на ее свариваемость и вибрационную стойкость. Поэтому для сравнения сталей Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс при ручной и автоматической сварке использован прокат 20 мм.

Результаты исследований стали 18Г2АФпс (2-х плавок) указаны в главе III реферата.

$$\text{Пределы выносливости } \sigma_{+0,2} \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \left(\times 10 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \right)$$

(автоматическая сварка)

Марка стали	Ст.3сп (п. р.)	Ст.3сп (о. р.)	Ст.3пс	Ст.3кп (х. з.)	Ст.3Гпс (18Гпс)	18ГФпс	18Г2АФпс (пл. 1814)	18Г2АФпс (пл. 4213)
Толщина проката, мм								
8	11,9	11,8	11,3	10,2	12,5	9,9	11,2	11,7
12	9,7	11,8	10,5	9,3	10,0	11,3	10,3	11,8
20	8,9	9,3	11,4	9,6	8,8	9,4	8,5	

Для ручной сварки применялся электрод УОНИ 13/45А типа Э42А-Ф (ГОСТ 9467-60) с фтористо-кальциевым покрытием, широко применяемый в судостроении для сварки низколегированных и высокопрочных сталей с $\sigma_t \leq 45$ кгс/мм² и электроды АНО-4 и МР-3 типа Э46-Т с рутил-карбонатным покрытием, внедряемые в судостроение. Для оценки свойств сварного соединения проверялся химсостав наплавленного металла для стали Ст.3сп (п. р.) и 18Гпс. Содержание углерода для стали Ст.3сп и Ст.3Гпс установлено одинаковым при сварке каждым электродом на верхнем уровне норм ГОСТа 9467-70—0,11—0,14%, а содержание марганца—0,50—0,65% (УОНИ 13/45А), 0,5—0,9% (АНО-4, МР-3), что в пределах норм. Для стали Ст.3Гпс содержание марганца больше, чем для стали Ст.3сп на 0,02% (УОНИ 13/45А), на 0,22% — (АНО-4), на 0,09% — (МР-3). Для листового проката 20 мм из стали Ст.3сп и Ст.3Гпс (18Гпс) испытывались 3 серии балок (по 11—15 шт. в каждой). Сварка производилась вручную на стандартном режиме ($I_{св}=200—210$ А, $U_d=25$ В, скорость сварки была примерно одинаковой) электродами 3-х марок (ГОСТ 9466-60). Для каждой стали испытано по 32—41 балки.

1) При сварке ответственных за прочность (вибростойкость) швов электродом УОНИ 13/45А результаты испытаний стали Ст.3сп (п. р.) и Ст.3Гпс (18Гпс) принадлежат одной и той же области рассеяния.

2) При сварке электродом марки АНО-4 результаты мало отличаются от результатов при сварке электродом УОНИ 13/45А, а линии выносливости для сталей Ст.Зсп (п. р.) и Ст.ЗГпс практически совпадают.

3) При сварке электродом марки МР-3 результаты отличаются в пользу стали Ст.ЗГпс (18Гпс), результаты для стали Ст.ЗГпс не имеют выпадов в область значений для стали Ст.Зсп (п. р.), расположенную ниже.

При ручной сварке (лист 20 мм) получены более высокие пределы выносливости, чем при автоматической: для стали Ст.Зсп—на 1,6—1,8 кгс/мм², для Ст.ЗГпс—на 2,2—3,7 кгс/мм². Сталь Ст.ЗГпс (18Гпс) при ручной сварке имеет предел выносливости на 0,5—2,0 кгс/мм² выше, чем сталь Ст.Зсп (наибольшее отличие при сварке электродом МР-3).

Таблица 2

Пределы выносливости $\sigma_{+0,2} \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \left(\times 10 \frac{\text{МН}}{\text{М}^2} \right)$
(ручная сварка)

Марка стали	Толщина проката, мм	Марка электрода		
		УОНИ 13/45А	МР—3	АНО—4
Ст.Зсп (п. р.)	20	10,5	10,5	10,7
Ст. ЗГпс (18Гпс)	20	11,0	12,5	11,7

Первостепенное значение для надежности сварных конструкций имеет высокая сопротивляемость конструкционных материалов хрупким разрушениям.

В главе V приведены результаты сравнительных исследований на хладостойкость при ударном изгибе сталей Ст.ЗГпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс и спокойных сталей 09Г2 (данные ЦНИИСКА), 10ХСНД (результаты Канфора С. С.). Испытание на ударную вязкость для листового проката толщиной 12 и 20 мм выполнено на образцах типа I (сечением 10×10 мм) и V (сечением 5×10 мм) с надрезом Менаже (прокат 8, 12, 20 мм) в диапазоне температур +20÷(−60) с интервалом 10°C для сталей в горячекатаном или нормализованном состоянии и после механического старения. Для листового проката 12 мм в состоянии поставки испытывались образцы типа IV с надрезом Шарпи. Механическое старение образцов выполнялось

по ГОСТу 7268-67 ($t=250^\circ\pm 10^\circ\text{C}$ —1 час, после остаточной деформации растяжением $10\pm 0,5\%$). Результаты оформлялись графиками $a_n - t^\circ\text{C}$, $a_{нт} - t^\circ\text{C}$.

1. ГОСТ 380-71 установил для стали ВСт.Зпс, ВСт.Зсп и ВСт.ЗГпс одинаковые нормы ударной вязкости на образцах поперек проката: лист толщиной 5—9 мм— $a_{нт+20^\circ} \geq 8$, $a_{нт-20^\circ} \geq 4$, после механического старения $a_{нт-20^\circ} \geq 3$ кгс·м/см², лист толщиной 10—25 мм (для стали Ст.ЗГпс—10÷30 мм)— $a_{н+20^\circ} \geq 7$, $a_{н-20^\circ} \geq 3$, после механического старения $a_{н+20^\circ} \geq 3$ кгс·м/см².

Установлено, что на образцах типа V стали в прокате толщиной 8 мм имеют ударную вязкость выше этих норм: с наибольшим превышением сталь Ст.Зсп (п. р.) и Ст.ЗГпс, с минимальным—Ст.Зкп—х. з. Прокат толщиной 12 и 20 мм на образцах типа V (из поверхностного слоя) сталей Ст.Зсп (о. р. и п. р.), Ст.Зпс, Ст.ЗГпс соответствует норме, кроме проката 20 мм (из центрального слоя) стали Ст.Зкп (в горячекатаном состоянии и после старения). Сталь Ст.ЗГпс (листы 8, 12, 20 мм) превосходит сталь Ст.Зпс (п. р. и о. р.) в горячекатаном состоянии и после механического старения в 1,5—2 раза (образцы типа V). На образцах типа I только листы 12 и 20 мм сталей Ст.Зсп (п. р.) и Ст.ЗГпс в полной мере соответствуют норме, причем с большим превосходством прокат стали Ст.ЗГпс (см. рис. 3). Сталь Ст.Зпс (листы 12 и 20 мм) удовлетворяет норме только в состоянии поставки, а при температуре −20°C и после старения не удовлетворяет. Сталь Ст.Зсп (о. р.) соответствует норме при плюс и минус 20°C минимально, а после старения не удовлетворяет ей. Сталь Ст.ЗГпс (листы 12 и 20 мм) в двух состояниях до температуры минус 30—40°C превосходит сталь Ст.Зсп (п. р. и о. р.), а при минус 30—60°C стали равноценны. По увеличению склонности к механическому старению стали располагаются в следующем порядке: Ст.ЗГпс, Ст.Зсп (п. р.), Ст.Зсп (о. р.), Ст.Зпс, Ст.Зкп.

Критическая температура хрупкости $T_{к1}$ (по допуску 3 кгс·м/см², образцы типа I, V) для листов 12, 20 мм стали Ст.ЗГпс (горячекатаное состояние) на 0—20°C ниже значений для сталей Ст.Зсп (п. р. и о. р.). После механического старения преимущество стали Ст.ЗГпс еще значительнее.

$T_{к1}$ для листов 8, 12 и 20 мм стали Ст.ЗГпс (образцы типа I) на 15—35°, а на образцах типа V на 30—60° (по допуску 3 и 4 кгс·м/см²) ниже, чем у стали Ст.Зсп (табл. № 3).

Показатель чувствительности к механическому старению C_1 и C_2 на 0—30,3% ниже у стали Ст.ЗГпс, чем у стали Ст.Зсп. В прокате толщиной 8 мм (образцы типа V) сталь Ст.Зпс равноценна стали Ст.Зсп (о. р.) ($T_{к1} = -60^\circ\text{C}$), а для кипящей стали $T_{к1}$ выше на 15°C.

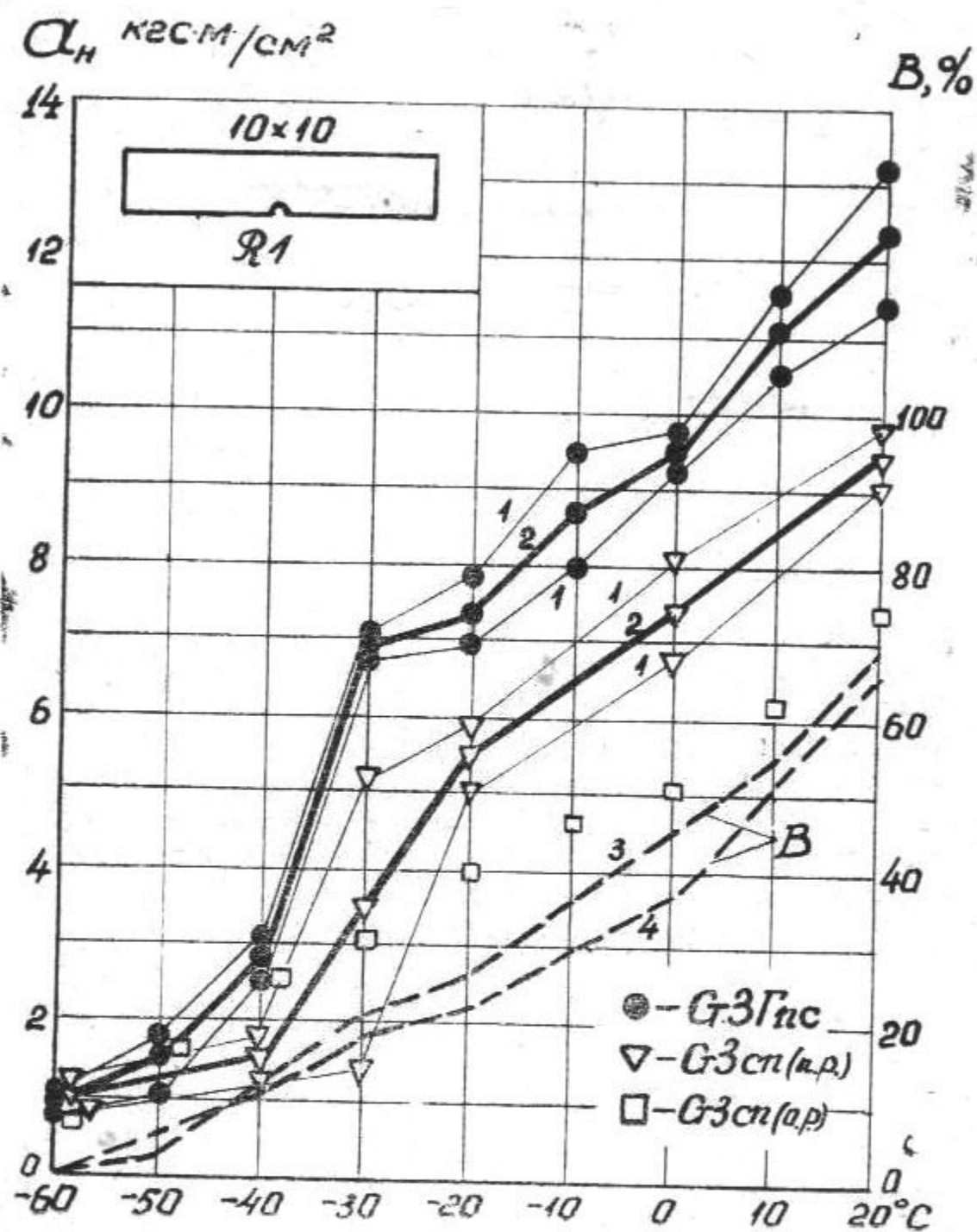


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости и содержания волокна в изломе стали марок Ст.3Гпс (18Гпс) и Ст.3сп (лист толщиной 20 мм) от температуры испытания: 1—предельные значения; 2—средние; 3—Ст.3Гпс (18Гпс); 4—Ст.3сп (о. р.)

2. Полуспокойная сталь 18ГФпс превосходит базовую сталь 18Гпс по хладостойкости в горячекатаном состоянии и после старения. Ванадий в количестве до 0,1% при микролегировании полуспокойной стали, кроме упрочняющего эффекта, обеспечивает снижение

Таблица 3

Критические температуры хрупкости °C:

$$T_{к1} \left(\text{по допуску } a_n = 3 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^2} \right); T_{к2} \left(\text{по } \% B = 50\% \right);$$

$$T_{10\%} \left(\text{по } \% B = 10\% \right)$$

Марка стали	Толщина проката, мм	$T_{к1}$	$T_{к2} (T_{50\%})$	$T_{10\%}$	$T_{к1}$	$T_{к2} (T_{50\%})$	$T_{10\%}$
		в горячекатаном состоянии			после механического старения		
Ст.3сп (о. р.)	12	-30 (-40)	0	-40 (-50)	выше +20	выше +20	+5
	20	-30 (-30)	0 (+10)	-40	выше +20	выше +20	+10
Ст.3Гпс (18Гпс)	12	-50	-10	-50	-15	выше +20	-20
	20	-35	0	-40	+5	выше +20	-5
18ГФпс	12	-50	0	-50	-20	+10	-5
	20	-45	-5	-50	-10	+10	-5
18Г2АФпс	12 ¹⁾	ниже -60	-40	ниже -70	ниже -60	-15	-50
	12 ²⁾	ниже -60	-35	-70	-55	-10	-45
	20 ²⁾	ниже -60	-35	-70	-55	-10	-45

Примечание. Значения в скобках для стали Ст.3сп (п. р.): 1) пл. № 4213, 2) пл. № 1814—сталь 18Г2АФпс нормализованная.

$T_{к1}$ и $T_{к2}$ в основном за счет измельчения действительного зерна стали и связывания азота в нитриды ванадия. Действительное зерно феррита у стали 18ГФпс на 0,5 балла меньше, чем у стали 18Гпс. Микролегирование ванадием приводит к снижению чувствительности стали 18ГФпс к механическому старению при оптимальной температуре конца прокатки.

По ЧМТУ 1-727-69 для горячекатаной стали 18ГФпс установлены нормы: для проката 4—10 мм $a_{н-40^\circ} (a_{нт-40^\circ}) \geq 4$ и для проката 11—20 мм $a_{н-40^\circ} \geq 3$, а после старения $a_{н-20^\circ} (a_{нт-20^\circ}) \geq 3 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^2}$, $T_{к1}^{\text{сп}}$ — минус 50—60°C и ниже (лист 12 мм) и минус

50°C и ниже (лист 20 мм). Нормы приняты с учетом замены спокойной стали 09Г2 (горячекатаная—4—20 мм). Исследованная плавка полностью удовлетворяет им (прокат 8, 12, 20 мм). Хладостойкость стали 18ГФпс (образцы типа I, прокат 8, 12, 20 мм) выше, чем у стали 18Гпс, что особенно заметно для листового проката 20 мм. Значение $T_{к1}$ на 0—10°C ниже для стали 18ГФпс, а после старения ниже на 5—15°C (образцы типа I), на 10—20°C (образцы типа V).

Для стали 18ГФпс характерно равномерное снижение ударной вязкости с понижением температуры до минус 60°C, что особенно важно при применении этой стали в сварных конструкциях.

Показатели C_1 и C_2 у стали 18ГФпс от 0,6 до 26,2% ниже, чем у стали Ст.3Гпс.

3. Полуспокойная сталь 18Г2АФпс повышенной прочности получена при совместном микролегировании азотом, обладающим сильным упрочняющим действием, и нитридообразующим элементом ванадием, связывающим азот. По ЧМТУ 1-741-69 для этой стали установлены нормы $a_{н-40} (a_{нт-40}) \geq 4$, $a_{н-60} \geq 3$ после механического старения $a_{н+20^\circ} \geq 3 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$, а $T_{к1}$ ниже минус 60—70°C (прокат 8—30 мм образцы типа I, V). Сталь 18Г2АФпс превосходит эти нормы (табл. 3). В диапазоне температур от +20 до —60°C

ударная вязкость изменялась постепенно до значения $3,8—4,4 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$

при минус 60°C (образцы типа I), а после механического старения до 1,9—3,5 кгс/мм², что получено при оптимальной температуре конца прокатки листов 920—950°C. Сталь имеет низкую чувствительность к старению. Показатель C_1 при температуре +20°C составлял 16,7—32,1% (образцы типа I), C_2 —0—8% (образцы типа I). Ударная вязкость стали 18Г2АФпс (образцы типа I, V) практически не зависит от толщины проката.

В главе VI, разделе 1 дана оценка склонности стали к хрупкому разрушению по виду излома ударных образцов, который приближенно отражает способность стали сопротивляться разрушению. Оценка качества стали по виду излома нашла широкое применение. Этому посвящен ряд работ: Брауна М. П., Потака Я. М., Владимирского Г. А., Дроздовского Б. А., Фридмана Л. Б., Гуляева А. П.

Определение границ порога хладноломкости для стали повышенной прочности по % волокна в изломе (% B) часто является един-

ственно достоверным методом. Процент вязкой составляющей определялся по разности площади поперечного сечения образца (100%) и доле хрупкой составляющей с точностью $\pm 5\%$. Установлены критические температуры хрупкости, соответствующие верхней, средней и нижней температурам порога хладноломкости: $T_{90\%}$ (в изломе 90% B), $T_{50\%} (T_{50\%})$ (B=50%), принимаемая за допустимый температурный предел эксплуатации ответственных конструкций, $T_{10\%} (B=10\%)$ (табл. 3). % B замерялся по образцам типа I для листов 12 и 20 мм. По значению $T_{к2} (T_{50\%})$ на 0—10°C (горячекатаное состояние), а после механического старения по $T_{10\%}$ на 15—25°C сталь Ст.3Гпс превосходит сталь Ст.3сп. Сталь 18ГФпс не отличается от стали 18Гпс по значению $T_{к2}$ и $T_{10\%}$ (в состоянии поставки и после механического старения). Для стали 18Г2АФпс критические температуры значительно ниже, чем для стали Ст.3Гпс и 18ГФпс (табл. 3).

Высокая надежность материала против разрушения должна обеспечиваться его способностью сопротивляться возникновению трещины и особенно ее развитию.

В разделе 2 дана оценка хладостойкости стали (прокат толщиной 12 мм) по величине работы зарождения и развития трещины. По величине ударной вязкости $a_{н}$ (образец типа I) $a_{н0,2}$ (образец типа IV с радиусом надреза 0,2 мм) при испытании от +20 до —60°C подсчитывалась $a_3 = 1,25 (a_{н} - a_{н0,2})$, а $a_p = a_{н} - a_3$ (методом Гуляева А. П.). По величине a_3 и a_p сталь Ст.3Гпс несколько превосходит сталь Ст.3сп до температуры —30°C, а ниже — стали равноценны. Данные a_3 и a_p для стали 18ГФпс показывают ее превосходство над спокойной сталью 09Г2 в основном при температурах ниже минус 30°C. Сталь 18Г2АФпс по работе зарождения трещины равноценна стали 18ГФпс, а по работе развития трещины существенно ее превосходит (графики $a_p - t^\circ\text{C}$ рис. 4).

Важное значение имеют данные для внедряемых сталей о минимальной температуре, до которой они могут эксплуатироваться без опасности хрупкого разрушения.

В разделе 3 дана оценка полуспокойных сталей марок Ст.3Гпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс по порогу хладноломкости, определяющему минимальную температуру эксплуатации сталей (по критерию % B = 30%, гарантирующему $a_p \geq 1 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$). Спокойная сталь Ст.3сп (о. р.) немного не удовлетворяет норме (на 5—10°C) для $T_{30\%}$, а по значению $T_{10\%}$ соответствует норме, после механического старения не удовлетворяет норме.

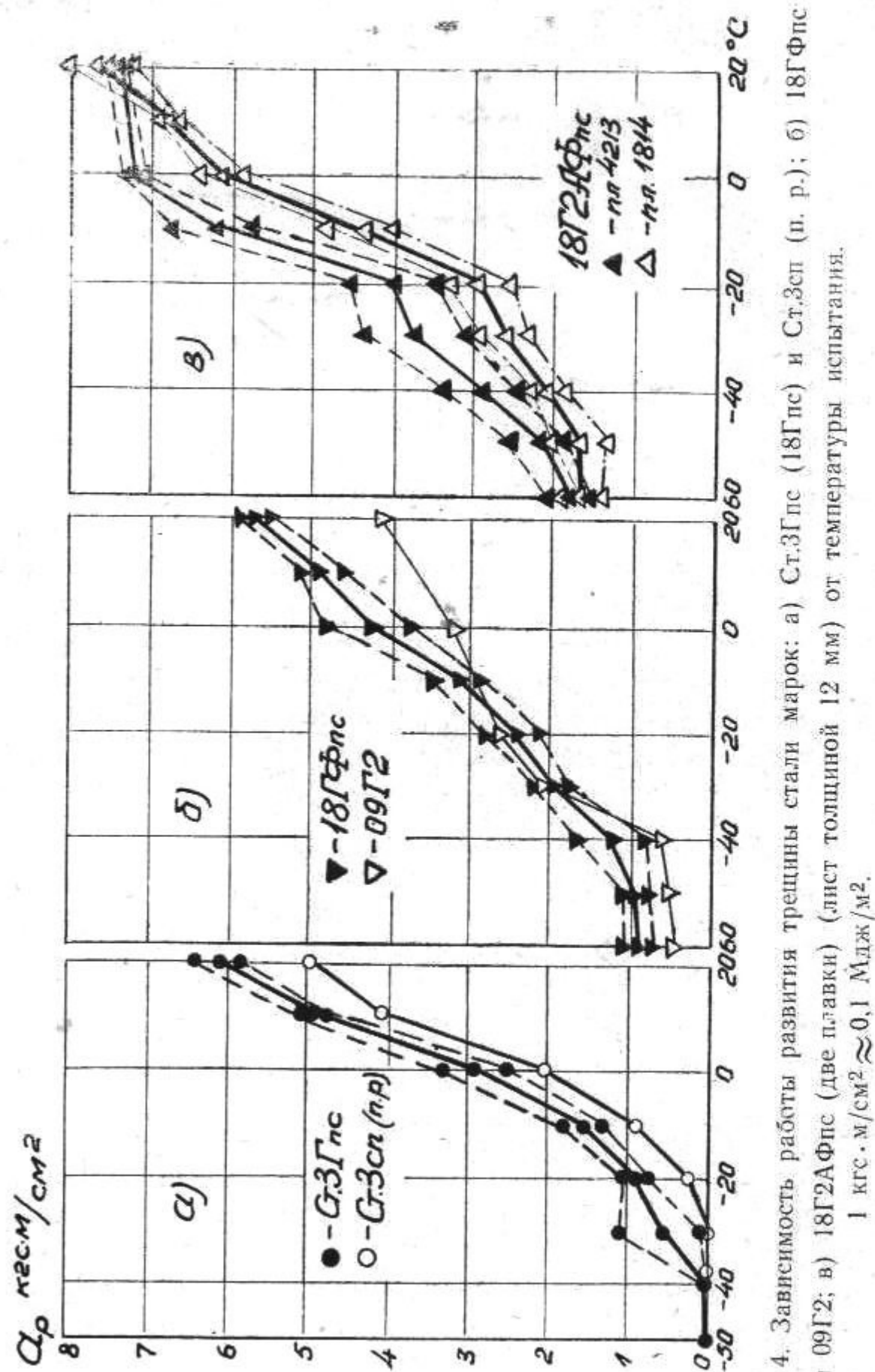


Рис. 4. Зависимость работы развития трещины стали марок: а) Ст.3Гпс (18Гпс) и Ст.3сп (н.р.); б) 18Г2АФпс (н.р.); в) 18Г2АФпс (п.р.) от температуры испытания. (лист толщиной 12 мм) 1 кгс·м/см² $\approx$ 0,1 Мдж/м².

Полуспокойная сталь Ст.3Гпс (в 2-х состояниях) по $T_{30\%}$ и $T_{10\%}$ удовлетворяет норме для спокойной стали.

Для спокойной стали 09Г2 нормативное значение минимальной температуры эксплуатации установлено в горячекатаном состоянии $T_{30\%} = -30^\circ\text{C}$, $T_{10\%} = -50^\circ\text{C}$, после механического старения $T_{30\%}^{\text{ст}} = 0^\circ\text{C}$. Учитывая допуск при определении $T_{30\%}$, $T_{10\%}$ и $T_{30\%}^{\text{ст}}$ сталь 18ГФпс удовлетворяет нормам для стали 09Г2.

Полуспокойная сталь 18Г2АФпс после нормализации имеет значение порога хладноломкости $T_{30\%}$ минус 45°C , а после старения $T_{30\%}^{\text{ст}} = -(20 \div 30^\circ\text{C})$, что удовлетворяет нормам для спокойной горячекатаной стали 10ХСНД и 15ХСНД. Значение $T_{10\%}$ для стали 18Г2АФпс (после нормализации) лежит за пределами минус 70°C , что удовлетворяет норме для сталей 10ХСНД и 15ХСНД. (табл. 4).

Таблица 4

Порог хладноломкости—минимальная температура эксплуатации сталей $^\circ\text{C}$ —
 $T_{30\%}$ (по $\%B = 30\%$, $a_p \geq 1 \text{ кгс} \cdot \text{м/см}^2$)

Марка стали	Толщина проката, мм	В горячекатаном состоянии	После механического старения
Ст.3сп (о. р.)	12,20	-10, -15	выше +20
Ст.3Гпс	12,20	-25, -20	+15
18ГФпс	12,20	-20	+5 +10
18Г2АФпс *	12,20	-45 (-45)	-20 (-30)
пл.1814			
Н о р м а т и в н ы е д а н н ы е			
Ст.3сп	до 25	-20 ± 10	0 ± 10
09Г2	до 20	-30 ± 10	0 ± 10
10ХСНД	до 15	-40 ± 10	-10 ± 10

* Сталь в нормализованном состоянии; в скобках значения для листа 12 мм пл. 4213

В ы в о д ы

1. По вибрационной стойкости при асимметричном цикле нагружения ($\rho = 0,2$) сварных крупногабаритных образцов-балок, изготовленных из листового проката 8, 12, 20 мм, малоуглеродистая сталь марки Ст.3 спокойная, полуспокойная и кипящая практически равноценны.

2. Полуспокойная и кипящая малоуглеродистая сталь не должна иметь ограничений к применению в сварных конструкциях по виду испытываемых нагрузок. Спокойная сталь Ст.3 с обычной (0,4 кгс/т Al) и повышенной (1,0 кгс/т Al) степенью раскисленности по вибрационной стойкости сварных соединений равноценны.

3. Выносливость одностипных сварных соединений из листового проката 8, 12, 20 мм полуспокойной стали Ст.3Гпс ($M_p = 0,8 \div 1,1\%$) и спокойной стали Ст.3сп практически одинакова при ручной сварке электродами УОНИ 13/45А, АНО-4, МР-3 и автоматической под флюсом ОСЦ-45.

4. Выносливость одностипных сварных соединений из полуспокойных сталей повышенной прочности ($\sigma_t \geq 31-45 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$) (листовой прокат 8, 12, 20 мм) 18ГФпс (горячекатаная) и 18Г2АФпс (нормализованная) равноценна малоуглеродистой спокойной стали Ст.3сп, а пределы выносливости лежат на одном уровне.

5. Установлено, что полуспокойная сталь Ст.3Гпс (18Гпс) в листовом прокате толщиной до 20 мм включительно в большей мере, чем спокойная сталь Ст.3сп, удовлетворяет требованиям ГОСТа 380-71 по механическим свойствам, величине ударной вязкости при низких температурах (как в горячекатаном состоянии, так и после деформационного старения) и обладает пониженной чувствительностью к старению. Критические температуры хрупкости T_{K1} , T_{K2} ($T_{50\%}$), $T_{10\%}$, показатели C_1 , C_2 у стали Ст.3Гпс ниже или равноценны значениям для спокойной стали Ст.3сп, раскисленной 0,4 и 1,0 кг/т Al. Работа зарождения и развития трещины (a_3 и a_p) и $\% B$ выше у стали Ст.3Гпс до температуры минус 30—40°C, а при более низких температурах стали равноценны.

Минимальная температура эксплуатации (по $\% B = 30\%$) ниже у стали Ст.3Гпс в сравнении со спокойной сталью Ст.3сп (в двух состояниях).

6. Полуспокойная сталь 18ГФпс (микролегированная ванадием, прокат 8—20 мм) по показателям прочности, величине ударной вязкости при низких температурах (в горячекатаном состоянии и после механического старения) удовлетворяет нормативным данным для стали 09Г2 (горячекатаная, прокат 4—20 мм).

Критические температуры хрупкости T_{K1} , T_{K2} ($T_{50\%}$), $T_{10\%}$ и показатели C_1 и C_2 полуспокойной стали 18ГФпс (в двух состояниях) ниже, а $\% B$ выше, чем для стали 18Гпс ($\sigma_t \geq 25 \text{ кгс/мм}^2$).

Сталь 18ГФпс по значению T_{K1} на 5—10°C превосходит спокойную сталь 09Г2. По величине a_3 при температурах от —30 до —60°C сталь 18ГФпс превосходит сталь 09Г2, по величине a_p — равноценна ей. Прочностные и пластические свойства стали 18ГФпс мало зависят от толщины проката.

7. Полуспокойная сталь 18Г2АФпс в нормализованном состоянии (прокат толщиной 8—20 мм) обладает высокой прочностью ($\sigma_t = 42,6-58,4$, $\sigma_b = 56-68,2 \text{ кгс/мм}^2$), хорошей пластичностью ($\delta_5 = 29,5-34,0\%$), высокой хладостойкостью (ударная вязкость при —60°C = 3,8—6,9 кгс·м/см²), чувствительностью к механическому старению. Сталь 18Г2АФпс превосходит по величине ударной вязкости (после нормализации и механического старения), значениям T_{K1} , T_{K2} ($T_{50\%}$), $T_{10\%}$ нормы, установленные для низколегированной спокойной стали 10ХСНД (СХЛ-4) (горячекатаная, прокат 4—20 мм). Минимальная температура эксплуатации стали 18Г2АФпс ниже на 5—10°C, чем для стали 10ХСНД. Ударная вязкость стали 18Г2АФпс (в двух состояниях) практически не зависит от толщины проката (8—20 мм) при температурах от +20° до —60°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных сравнительных исследований физико-механических и служебных свойств полуспокойную сталь Ст.3Гпс (18Гпс) в прокате до 20 мм соответствующих групп и категорий можно использовать в судостроении наряду со спокойной сталью Ст.3сп, как ее полноценный заменитель.

Полуспокойную сталь 18ГФпс (горячекатаную с $\sigma_t \geq 31 \text{ кгс/мм}^2$) и 18Г2АФпс (нормализованную с $\sigma_t \geq 40 \text{ кгс/мм}^2$) в прокате толщиной до 20 мм можно рекомендовать к применению в судостроении наряду со сталями 09Г2 и 10ХСНД (СХЛ-4) соответственно.

На основной корпус сухогрузного теплохода проекта 507Б используется спокойная сталь Ст.3сп в количестве 968 т и сталь 10Г2С1Д-35 в количестве 161 т. Учитывая разницу в цене (Ст.3Гпс дешевле на 2 руб/т проката, чем Ст.3сп, а сталь 18ГФпс примерно на 5 руб/т дешевле, чем сталь 10Г2С1Д-35), экономический эффект от применения полуспокойных сталей составит более 2700 руб.

Содержание диссертации опубликовано в следующих изданиях.

1. Волский М. И., Гуменный Л. К., Авдентов Л. Н. Исследование применимости полуспокойной и кипящей стали для корпусов судов внутреннего плавания. Речной транспорт, № 7, 1971.

2. Авдентов Л. Н. Исследование хладостойкости полуспокойных сталей Ст.3Гпс, 18ГФпс и 18Г2АФпс по характеристике вязкой составляющей в изломе ударных образцов. Материалы конференции ГИИВТа, Горький, 1974.

3. Авдентов Л. Н. К вопросу исследования вибрационной стойкости сварных соединений новых полуспокойных сталей 18Гпс, 18Г2АФпс. Материалы конференции ГИИВТа, часть II, Горький, 1970.

4. Авдентов Л. Н. Сравнительное исследование выносливости малоуглеродистой листовой стали марок Ст.Зсп, Ст.Зпс, Ст.Зкп, а также низколегированных полуспокойных сталей перспективных в судостроении. Труды ГИИВТа, вып. 112 «Вопросы прочности деталей машин». Горький, 1971.

5. Авдентов Л. Н. Хладостойкость новых полуспокойных сталей 18Гпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс. Материалы конференции ГИИВТа, Горький, 1971.

Содержание диссертации докладывалось автором на Всесоюзном семинаре «Состояние и перспективы применения полуспокойных сталей», организованном МЧМ СССР (сентябрь 1969) и на Координационном совещании по проблеме: «Совершенствование способов и технологии разлива углеродистой и низколегированной полуспокойной стали. Улучшение качества слитка» (июнь, 1970 г.) по разделу «Исследование физико-механических и служебных свойств полуспокойных сталей, разработка рекомендаций по их применению взамен спокойных».

Доклады по теме диссертации были сделаны на конференциях профессорско-преподавательского состава ГИИВТа в 1967—1972 гг. (ежегодно) и в 1974 г.

Результаты исследования были приняты во внимание при разработке проекта внесения в стандарт: «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие технические требования» взамен ГОСТа 380-60 полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца марок Ст.ЗГпс, Ст.5Гпс. Новый ГОСТ 380-71, вступивший в действие с 1 января 1972 г., включил в себя новую полуспокойную сталь Ст.ЗГпс (18Гпс).