

Министерство высшего и среднего специального образования

С С С Р

Челябинский политехнический институт

имени Ленинского комсомола

АЧИНОВИЧ Николай Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ  
ЕЁ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ

Специальность 05.04.05 -

"Технология и машины сварочного производства"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

1975

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства".

Научные руководители - профессор, докт. техн. наук О.А.Бакши,  
доцент, канд. техн. наук Н.А.Клыков.

Официальные оппоненты - профессор, докт. техн. наук В.В.Степанов,  
доцент, канд. техн. наук И.Я.Березин.

Ведущее предприятие - Уральский завод тяжелого машиностроения им. С.Орджоникидзе (УРАЛМАШзавод).

Автореферат разослан " " ноября 1975 года.

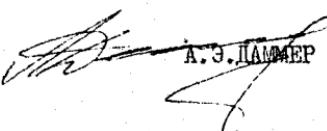
Запись диссертации состоится " " декабря 1975 года в  
часов, в аудитории 224 (конференцзал) на заседании Совета  
по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов  
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся  
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета  
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола  
или прислать свои отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью  
Вашего учреждения.

Адрес института: 454044, г.Челябинск, проспект им.В.И.Ленина,  
76, Ученый Совет института, тел. 39-39-64.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
доцент, канд. техн. наук

  
А.Э.ДАМЕР

Челябинский  
политехнический институт  
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время 98% всех металлоконструкций изготавливается с применением сварки, причем около 80% их общего количества из малоуглеродистых сталей прочностью 38–42 кгс/мм<sup>2</sup>.

Постановление Правительства СССР об ускорении технического прогресса и дальнейшем повышении производительности труда в сварочном производстве, принятое в октябре 1970 года, предусматривает ускорение научно-исследовательских работ, направленных на повышение качества и снижение затрат на проектирование и изготовление сварных конструкций.

Одним из наиболее эффективных способов экономии металла, снижения веса и повышения допускаемых нагрузок сварных конструкций является применение высокопрочных сталей.

Актуальность работы. При эксплуатации большинство сварных конструкций воспринимают переменные нагрузки, которые с течением времени могут вызывать усталостные трещины и разрушения.

Из работ Г.А.Николаева, И.В.Кудрявцева, В.И.Труфякова, Н.О.Окерблома, М.М.Гохберга, А.Е.Асниса, К.П.Большакова, О.А.Бакши, Н.А.Клыкова, Е.Е.Кочерговой, А.А.Бать и других известно, что применение высокопрочных сталей для сварных конструкций взамен малоуглеродистых не всегда сопровождается повышением их выносимости.

Причиной этого по мнению ряда ученых является их повышенная чувствительность к концентрации напряжений (надрезу). Чувствительность к надрезу основного металла с прокатной поверхностью и металла различных зон сварных соединений в широком диапазоне изменения прочности сталей, а также влияние концентрации напряжений на их предел выносливости до настоящего времени в комплексе систематически не исследовалась.

Недостаточная изученность этих вопросов, а также отсутствие расчетных способов дифференцированной оценки влияния прочности, концентрации напряжений, изменения механических свойств и остаточных напряжений на выносливость сварных соединений, сдерживают творческую инициативу конструкторов в вопросах широкого применения высокопрочных сталей для сварных конструкций.

В диссертации сделана попытка частично восполнить указанный пробел.

Цель работы. На основании вышеизложенного целью настоящей работы явилось исследование чувствительности к концентрации напряжений и выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей с прокатной поверхностью и разработка инженерного способа расчетной оценки пределов их выносливости с учетом прочности стали, концентрации напряжений, масштабного фактора, режимов сварки и остаточных напряжений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) исследовать чувствительность к концентрации напряжений сталей с прокатной поверхностью в связи с их прочностью;
- 2) исследовать влияние концентрации напряжений на выносливость сталей с прокатной поверхностью с учетом прочности и масштабного фактора;
- 3) исследовать выносливость сварных соединений из термоупрочненных сталей различной прочности без их последующей термообработки, а также соединений термообработанных после сварки с целью оценки влияния на их предел выносливости режима сварки и остаточных напряжений;
- 4) на основании анализа результатов исследований разработать инженерный способ расчетной оценки выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей с учетом упомянутых выше факторов;
- 5) оценить эффективность влияния поверхностного пластического деформирования на выносливость высокопрочных сталей с прокатной поверхностью и сварных соединений из них.

Общая методика выполнения работы. При изучении состояния вопроса установлено, что выносливость сварных соединений из высокопрочных сталей может быть выше, равна или ниже выносливости таких же соединений из малоуглеродистой стали. Имеющиеся данные и существующие способы расчетной оценки не позволяют ответить на вопрос о том, что является основной причиной такого положения.

На основе работ С.В.Серенсена, И.А.Однинга, А.Тума и В.Бухмана в диссертации разработаны расчетные формулы для оценки чувствительности к надрезу и учета влияния концентрации напряжений сталей с прокатной поверхностью, которые затем с учетом особенностей сварных соединений использованы при расчете их пределов выносливости.

вости. С помощью этих формул выполнен анализ чувствительности сталей к надрезу и влияния основных факторов на выносливость сварных соединений.

Экспериментальные исследования выполнены с учетом современных достижений в области изучения выносливости сварных соединений и направлены на выполнение поставленных задач. Опыты выполнены на спроектированных и изготовленных автором установках, позволяющих осуществить циклическое нагружение образцов изгибом при любой асимметрии цикла.

Результаты опытов обрабатывали методами математической статистики с помощью ЭВМ "Минск-22" и "Наира К". Значения коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_s$  исследуемых сварных соединений принимались на основе работ Г.А.Николаева, Д.И.Навроцкого, Г.А.Бельчука, В.И.ТруФякова и других, а так же собственных исследований поляризационнооптическим методом.

Исследования выполнялись как на образцах сварных соединений и натурных конструкциях сварных картеров ведущих мостов автомобилей "УРАЛ" при различном их конструктивном оформлении.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые выполнено систематическое исследование выносливости и чувствительности к надрезу сталей с прокатной поверхностью при широком диапазоне их прочностных свойств —  $\sigma_b = 40 \dots 180 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ , а также сварных соединений этих сталей. Установлены закономерности совместного и раздельного влияния на предел выносливости сварных соединений прочности стали, концентрации напряжений, масштабного фактора, режимов сварки и остаточных напряжений. На основе результатов исследований разработан инженерный способ расчетной оценки пределов выносливости, позволяющий дифференцированно учитывать влияние этих факторов на выносливость сварных соединений как термоупрочненных после сварки, так и соединений из термоупрочненных сталей, не подвергавшихся термообработке после сварки.

#### Практическая ценность и реализация результатов исследования.

Разработанная методика в отличие от существующих позволяет рассчитывать пределы выносливости сварных соединений и конструкций и устанавливать предельные нагрузки (напряжения), или предельные значения коэффициента концентрации напряжений без проведения долгостоящих длительных во времени усталостных испытаний.

Результаты работы были использованы:

- 1) при проектировании и отработке конструкции сварных картеров ведущих мостов автомобилей "Урал" на Уральском автомобильном заводе;
- 2) при разработке рекомендаций по проектированию и изготовлению динамического стенда.

Апробация работы выполнена в Челябинском политехническом институте, им. Ленинского комсомола на объединенном заседании кафедры сварки и совета научно-исследовательской лаборатории сварных конструкций и сварочных процессов (НИЛСК и СП). Материалы диссертации докладывались в 1969-1975 гг. на конференциях и семинарах в Киеве, Ленинграде, Ижевске, Курске, Челябинске.

По теме диссертации опубликовано четырнадцать статей.

Диссертация состоит из четырех глав и содержит 150 страниц машинописного текста, 26 таблиц, 79 рисунков и приложение, включающее 5 страниц. Перечень литературы включает 173 наименования, в том числе 14 на иностранных языках.

В первой главе "Прочность сварных соединений и конструкций из высокопрочных сталей при циклических нагрузках" на основе литературных данных показана экономическая целесообразность применения высокопрочных сталей для сварных конструкций.

Трудами ряда авторов (М.М.Гожберга, Н.О.Окерблома, А.Е.Асниса, Е.Е.Кочерговой и других) а так же автора диссертации установлено, что с повышением прочности стали с прокатной поверхностью предел выносливости возрастает. Однако выносливость сварных соединений из высокопрочных сталей, как показано в работах многих исследователей, может быть большей, равной или меньшей, чем у соединений из малоуглеродистых сталей. Причиной этого считают повышенную чувствительность высокопрочных сталей к надрезу. При этом некоторые авторы приходили к выводу о нецелесообразности применения высокопрочных сталей в сварных конструкциях, работающих в условиях повторно переменных нагрузок. Между тем отечественная и зарубежная практика показала большую эффективность применения конструкций из этих сталей. В ряде отраслей машиностроения применение высокопрочных сталей позволяет получить экономию металла 30-35% и повысить долговечность конструкций в 2-3 раза.

В главе рассмотрены существующие методы расчета выносливости сварных соединений, предложенные Н.О.Окербломом, В.И.Труфяковым и М.М.Гохбергом. Имеющиеся экспериментальные данные и методы расчета выносливости не позволяют выявить влияние основных причин, приводящих к резкому снижению предела выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей по сравнению с уровнем прочности основного металла.

В конце главы сделаны выводы, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе "Исследование выносливости и чувствительности к концентрации напряжений высокопрочных сталей" приводятся результаты исследования и анализ выносливости сталей с обработанной (полированной) и прокатной поверхностью в зависимости от прочности.

На основе выполненных исследований и данных С.В.Серенсена и И.А.Однига для расчета предела выносливости гладких образцов  $\sigma_{-1}^v$  из сталей с пределом прочности  $\sigma_b = 40 \dots 180 \text{ кгс/мм}^2$  в зависимости от масштабного фактора и чистоты обработки поверхности получена формула:

$$\sigma_{-1}^v = \frac{\sigma_{-1}^0}{\kappa_4} \epsilon_a, \quad (1)$$

где  $\epsilon_a$  - коэффициент влияния масштабного фактора на выносливость углеродистых и легированных сталей соответственно при изменении диаметра  $d$  от 7 до 300 мм.

Величина этого коэффициента определяется по формулам, полученным аппроксимацией зависимостей С.В.Серенсена:

для углеродистых

$$\epsilon_a^u = 1,0 - 0,20(\lg d - 0,81), \quad (2)$$

для легированных

$$\epsilon_a^l = 1,0 - 0,25(\lg d - 0,81), \quad (3)$$

$\sigma_{-1}^0$  - предел выносливости при симметричном цикле для образцов диаметром 7...12 мм с полированной поверхностью

$$\sigma_{-1}^0 = [0,5\sigma_b(1-6 \cdot 10^{-6}\sigma_b)](0,79 \dots 1,15) \text{ кгс/мм}^2 \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_b$  - временное сопротивление разрыву;

$$\kappa_4 = 1 + \alpha \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1}^0, \quad (5)$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий класс чистоты обработки поверхности (приведен в работе И.А.Однинга:  $\alpha = 0$  для полированной и  $\alpha = 20$  для прокатной поверхности).

Для плоских образцов с прокатной поверхностью в формулах (2) и (3) вместо величины  $\sigma_d$  необходимо подставить  $\sigma_d \sqrt{\frac{F}{d}}$ . При площади поперечного сечения  $F \geq 4000 \text{ mm}^2$ , как показал анализ, величина  $\sigma_d$  не зависит от  $F$  и, примерно, равна 0,62. Здесь знак  $\approx$  означает, что речь идет об образцах с прокатной поверхностью.

Сравнение опытных пределов выносливости  $\sigma_{-1}^v$  с расчетными, полученными по предложенным формулам для образцов с полированной и прокатной поверхностями, показало их удовлетворительную склонность (отклонения составляют в среднем  $\pm 12\%$ ).

В сварных соединениях их форма и различного рода дефекты создают концентрацию напряжений.

Степень концентрации напряжений, характеризуемая величиной теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\zeta_s = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$  ( $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{nom}$  соответственно максимальные и номинальные напряжения в сечении) изменяются, как известно из работ Г.А.Николаева, Д.И.Навроцкого, Г.А.Бельчука в пределах  $\zeta_s = 1 \dots 7$ .

При наличии концентрации напряжений стали различной прочности по разному склонны к снижению предела выносливости. Способность сталей к снижению предела выносливости при увеличении концентрации напряжений обычно характеризуется их чувствительностью к надрезу.

Для оценки чувствительности сталей к надрезу наиболее широко используется формула А.Тума и В.Бухмана:

$$\gamma = \frac{\beta - 1}{\zeta_s - 1}, \quad (6)$$

где  $\beta = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}}$  - эффективный коэффициент концентрации напряжений;  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-1K}$  - соответственно пределы выносливости гладких и надрезанных образцов при симметричном цикле изменения напряжений.

В работах В.С.Ивановой, М.П.Марковца и А.С.Лейкина приведены зависимости  $\gamma(\gamma)$  (здесь  $\gamma$  - радиус надреза) для некоторых соотношений  $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$ , однако они не учитывают масштабного фактора и чистоты обработки поверхности, что может привести при определении величин  $\beta$  или  $\sigma_{-1K}$  к существенным погрешностям.

В связи с этим в настоящей работе с учетом изменения чувствительности металлов к надрезу в зависимости от  $\alpha_{\text{g}}$  и существования предельно минимального предела выносимости  $\sigma_{-1k}^*$  для расчета величины  $\sigma_{-1k}(\alpha_{\text{g}})$  предложена формула:

$$\sigma_{-1k} = \sigma_{-1} \left( \frac{1 - C_{\text{g}}}{\alpha_{\text{g}}^n} + C_{\text{g}} \right) \text{ кгс/мм}^2 \text{ кгс/мм}^2, \quad (7)$$

где

$$C_{\text{g}} = \frac{\sigma_{-1k}^*}{\sigma_{-1}} = \frac{\alpha_{\text{g}}^n / \beta - 1}{\alpha_{\text{g}}^n - 1}; \quad (8)$$

$\sigma_{-1k}^*$  - предельно минимальный предел усталости;

$n$  - коэффициент, характеризующий крутизну кривой  $\sigma_{-1k}(\alpha_{\text{g}})$ , зависящий от прочности стали и равный:

$$n = 0,746 + 1,43 \cdot 10^{-2} \alpha_{\text{g}} - 6,7 \cdot 10^{-5} \alpha_{\text{g}}^2 \quad (9)$$

(здесь  $\alpha_{\text{g}}$  в  $\text{кгс/мм}^2$ ).

Для получения зависимости  $\sigma_{-1k}(\alpha_{\text{g}})$  по формуле (7) достаточно получить экспериментально значения  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{-1k}$ , т.е. необходимо испытать две серии образцов с различными значениями  $\alpha_{\text{g}}$ .

Обработка экспериментальных данных по формуле (8) показала, что величина  $C_{\text{g}}$  не зависит от того, при каких значениях  $\alpha_{\text{g}}$  (в интервале 1...9) были определены входящие в неё величины  $n$  и  $\beta$ . В то же время величина  $\alpha_{\text{g}}$  при этих уровнях концентрации напряжений изменяется в 1,5-2,5 раза. При этом величина  $C_{\text{g}}$  не зависит от формы образцов и надрезов.

Таким образом величина  $C_{\text{g}}$  выступает как характеристика материала наиболее объективно отражающая его чувствительность к надрезу.

Используя зависимости  $\sigma_{-1k}(\alpha_{\text{g}}, z)$  и  $\sqrt{A}$  ( $\alpha_{\text{g}}$ ), предложенные Куном, для расчета коэффициента  $C_{\text{g}}$  плоских образцов высотой сечения (в плоскости изгиба)  $h = 10 \dots 1000$  мм из стали прочностью  $\sigma_g = 40 \dots 180$  кгс/мм<sup>2</sup> получены формулы:

для изгиба

$$C_{\text{g}}''(h, \alpha_{\text{g}}) = 1,245 - 0,152 \lg \alpha_{\text{g}} (3,3 - \lg h) - 0,378 \lg h, \quad (10)$$

для одноосного растяжения

$$C_g(h, \epsilon_g) = 0,78 - 0,082 \lg \epsilon_g (3,25 - \lg h) - 0,24 \lg h. \quad (II)$$

Как показала выполненная нами обработка опытных данных ряда авторов, формулы (IO) и (II) можно применять для оценки  $C_g$  образцов круглого сечения заменив в них величину  $h$  диаметром  $d$ .

Для одной и той же марки стали с обработанной и прокатной поверхностями существенное различие в пределах выносливости наблюдается при малых значениях  $\alpha_g$  (1...5). Это различие уменьшается с увеличением  $\alpha_g$ , и при  $\alpha_g > 7...9$ , пределы выносливости ( $\sigma_{-1k}^v$ ) = ( $\sigma_{-1k}^o$ ) =  $\sigma_{-1k}^{*}$  (здесь  $\sigma_{-1k}^v$  — предел выносливости образцов с прокатной поверхностью). Основываясь на этом известном положении установлено, что коэффициент  $C_g^v$  в зависимости от класса чистоты обработки равен:

$$C_g^v = K_4 \cdot C_g. \quad (I2)$$

Подставив в формулу (8) значения  $\sigma_{-1k}^v$  и  $C_g^v$ , получим:

$$\sigma_{-1k}^v = \frac{\sigma_{-1k}^o \epsilon_g}{K_4} \left( \frac{1 - C_g^v}{\alpha_g^n} + C_g^v \right) \text{ кгс}/\text{мм}^2. \quad (I3)$$

Определив из (I3) величину  $\beta$  и подставив в формулу (6) получим:

$$\beta = \frac{\alpha_g^n (K_4 - C_g) + (C_g - 1)}{[1 + C_g (\alpha_g^n - 1)] \epsilon_g (\alpha_g - 1)}. \quad (I4)$$

Формулы (I3) и (I4) позволяют оценить чувствительность к надрезу и рассчитать пределы выносливости в зависимости от концентрации напряжений ( $\alpha_g$ ), масштабного фактора ( $\epsilon_g$ ), прочности стали ( $\sigma_g$ ) и состояния поверхностного слоя металла ( $K_4$ ).

Сравнение расчетных и опытных величин  $\sigma_{-1k}$  и  $\beta$  для стальных образцов показало их удовлетворительную сходимость (рис.1,2,3).

Анализ влияния различных факторов на чувствительность к надрезу и предел выносливости, выполненный по формулам (I3) и (I4) с помощью ЭВМ "Минск-22" и "Найри-К" показал, что:

I) чувствительность к надрезу сталей с прокатной и обработанной поверхностями снижается с увеличением концентрации напряжений (рис.3); с увеличением прочности повышается, достигает максимума при  $\sigma_g = 120-140 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ , а затем уменьшается (рис.4);

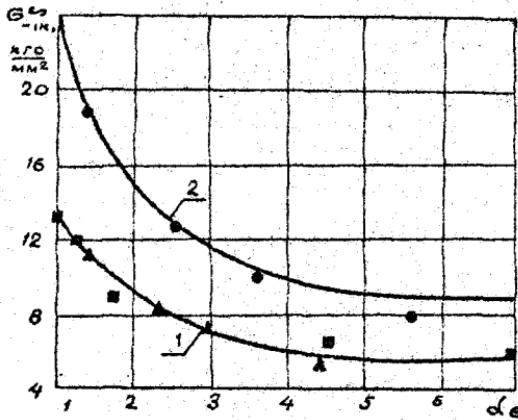


Рис.1. Сравнение расчетных пределов выносливости образцов с прокатной поверхностью с опытными: I -  $G_y = 43 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ ; 2 -  $G_y = 125 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ ; ▲ - М16С, В.И.Труфяков; ■ - Ст.3, М.М.Гохберг; ● - 25ХГСА, автор

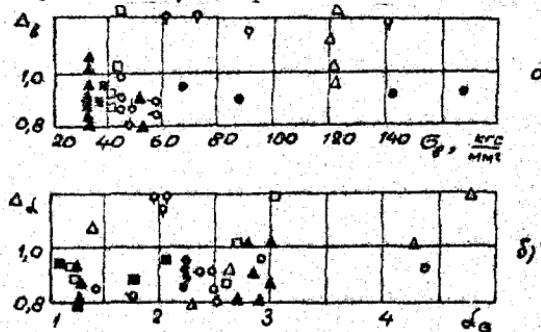
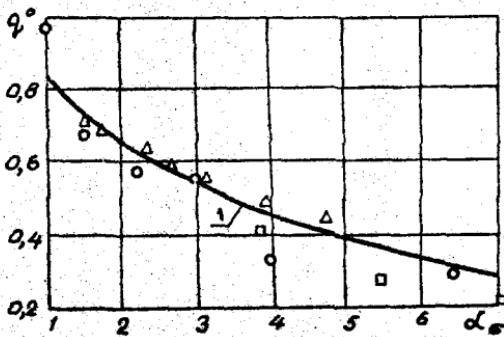
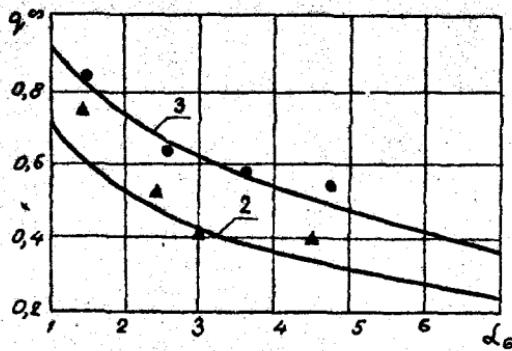


Рис.2. Зависимость отношения расчетных и опытных пределов выносливости  $\Delta = \frac{G_y^c}{G_y^{\text{оп}}}$  для образцов из сталей с прокатной поверхностью от времененного сопротивления (а) и коэффициента  $\alpha_y$  (б): □ - I10C, О.А.Бакши и др.; ○ - сталь 40; ⚡ - 10G2CI, К.А.Клыков и Е.С.Романов; ■ - Ст.3; □ - Ст.3, М.Рош и А.Эйхингер; △ - Сталь 15; ● - 30XGCA; ○ - М16С, В.И.Труфяков; ▲ - 10G2C; ▲ - 15XHSD; △ - 25XGCA



a)



б)

Рис.3. Сравнение расчетных значений коэффициента  $q$  (сплошные линии) с опытными для шлифованных (а) и образцов с прокатной поверхностью (б):  
 1 -  $G_g = 60 \text{ кгс}/\text{мм}^2$  ( $\alpha = 0$ ,  $h = 10 \text{ мм}$ ),  
 2 -  $G_g = 43 \text{ кгс}/\text{мм}^2$  ( $\alpha = 6$ ,  $h = 20 \text{ мм}$ ),  
 3 -  $G_g = 120 \text{ кгс}/\text{мм}^2$  ( $\alpha = 20$ ,  $h = 16 \text{ мм}$ ),  
 ○ - М.Рош и А.Эйхингер, △ - М.С.Неманов,  
 ▲ - В.И.Труфяков, ● - автор

2) чувствительность к надрезу сталей с прокатной поверхностью ниже, чем сталей с полированной поверхностью (рис.4);

3) предел выносливости сталей с прокатной поверхностью (при одинаковых условиях) выше у сталей с большей прочностью независимо от  $\alpha_s$ . При этом абсолютная величина различия в пределах выносливости больше при малых значениях  $\alpha_s$  = (1...3).

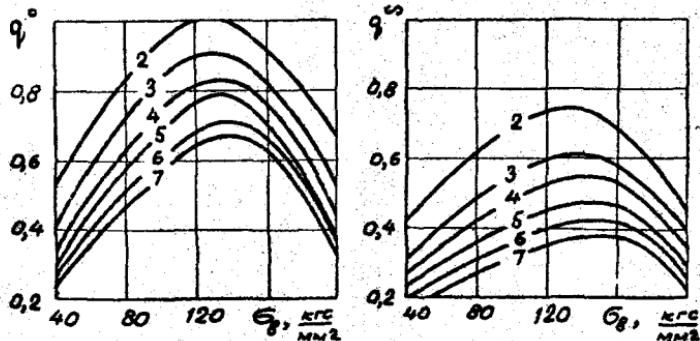


Рис.4. Влияние прочности стали на чувствительность к надрезу образцов  $d = 20$  мм:

а) полированных ( $\alpha_s = 0$ ); б) с прокатной поверхностью ( $\alpha_s = 20$ )  
(цифрами указаны значения  $\alpha_s$  )

Из вышеизложенного следует, что встречающиеся в литературе мнения об ограничении применения высокопрочных сталей с прокатной поверхностью для сварных конструкций, воспринимающих циклические нагрузки, взамен малоуглеродистых, вследствие их повышенной чувствительности к надрезу, является ограниченно обоснованным.

Отношение  $\frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}}$  при изменении величины  $\sigma_y$  в пределах 40...180 кгс/мм<sup>2</sup> изменяется в пределах 1...2,5. В работе выполнены исследования свойств металла поверхностного слоя различных марок сталей (Ст.3, Сталь 45, 15ХСНД, 10Г2С1, 17ГС, 25ХГСА и 15ХГ2СМФР) в исходном горячекатанном и в термоупрочненном состояниях, при этом термообработка выполнялась при различных температурах отпуска после закалки.

Исследования показали, что поверхностный слой металла на глубину 0,5...0,6 мм от поверхности обезуглерожен и имеет низкие в сравнении с металлом сердцевины, механические свойства, которые на поверхности независимо от марки стали и прочности сердцевины примерно равны свойствам сердцевины малоуглеродистых сталей. При этом обезуглероживание поверхности металла достигает 45%. Кроме того в поверхностном слое металла глубиной 0,05...1,1 мм расположено значительное количество дефектов в виде пор и надрывов, являющихся при переменных нагрузлениях концентраторами напряжений и очагами усталостных трещин.

Как показал анализ, существенное снижение величины  $\sigma_{-1}^{\infty}$  по сравнению с  $\sigma_{-1}^0$ , обусловлено главным образом обезуглероживанием поверхностного слоя и в меньшей мере дефектами в нем.

В результате изучения механических свойств металла поверхностного слоя сталей различной прочности автором получена зависимость предела текучести указанного металла  $\sigma_t^{\infty}$  от временного сопротивления сердцевины

$$\sigma_t^{\infty} = 21 + 92(l_9 \sigma_{-1}^0 - 1,6) \text{ кгс/мм}^2. \quad (15)$$

Формула (15) позволяет объяснить почему повышение прочности основного металла с обработанной поверхностью идет не пропорционально повышению прочности металла с прокатной поверхностью.

Третья глава "Выносливость сварных соединений из высокопрочных сталей" посвящена теоретическому анализу совместного и раздельного влияния прочности стали, концентрации напряжений, асимметрии цикла, режима сварки (скорости охлаждения после сварки) и остаточных напряжений растяжения на выносливость сварных соединений из высокопрочных сталей с прокатной поверхностью.

В результате анализа опытных данных М.Р.Шраермана и К.И.Лебедевой для конструкционных сталей ( $\sigma_t = 24...80 \text{ кгс/мм}^2$ ) получена зависимость временного сопротивления металла околосотовой зоны

от эквивалентного содержания углерода  $C_e = 0,36...1,1\%$  и скорости охлаждения при сварке  $W = 2...10^9 \text{ С/с}$ :

$$\sigma_t^0 = [45 + 91(0,36 + C_e)] \cdot [1,2 - 0,235(1,15 - l_9 W)] \text{ кгс/мм}^2. \quad (16)$$

При оценке выносливости сварных соединений из термоупрочненных сталей и соединений, термообработанных после сварки, величину

$\sigma'_6$  предлагается определять косвенным путем по твердости, замеренной на шлифах.

С учетом формул (4), (8)-(14), (16) и (17) разработана методика расчета пределов выносливости и допускаемых напряжений для сварных соединений из высокопрочных сталей. Допускаемые напряжения при данной асимметрии цикла

$$[\sigma_{pk}] = \frac{\sigma'_{-1K}}{n_c [1 - \frac{1}{2}(\rho_0 + 1)(1 - h'_K)]} - \frac{2h'_K}{1 - \rho_0} \sigma_0, \text{ кгс/мм}^2, \quad (17)$$

где  $n_c$  — коэффициент запаса по выносливости;

$\sigma_0$  — остаточные напряжения с учетом свойств металла в месте разрушения, равные после первого цикла нагружения

$$\sigma_0 = \sigma'_t - \sigma'_{pk}, \quad h'_K = \frac{\sigma'_{-1K}}{\sigma'_6}$$

$\sigma'_{-1K}, \sigma'_{pk}$  — пределы выносливости соответственно при  $\rho = -1$  и  $\rho = +1$  металла в рассматриваемом сечении сварного соединения, при отсутствии остаточных напряжений;

$$\sigma'_{-1K} = \frac{(\sigma'_t)^c_s (1 - c'_s)}{K_4 \left( \frac{\sigma'_t}{\sigma'_6} + c'_s \right)}, \quad \sigma'_{pk} = \frac{\sigma'_{-1K}}{1 - \frac{1}{2}(\rho_0 + 1)(1 - h'_K)};$$

$\sigma'_t$  — предел текучести металла в месте усталостного разрушения, определяемый по формуле (15);

$\rho_0$  — коэффициент асимметрии цикла с учетом остаточных напряжений, равный  $\rho_0 = \frac{\sigma_{min} + \sigma_0}{\sigma_{max} + \sigma_0}$ ;

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$  — максимальные и минимальные по абсолютному значению напряжения цикла от внешних нагрузок (подставляются с учетом знака)

Величины  $(\sigma'_t), c'_s, n_c, K_4$  определяются с учетом величины  $\sigma'_6$ .

Проверка сходимости опытных пределов выносливости с расчетными, полученными по методике, разработанной автором, производилась по результатам усталостных испытаний образцов сварных соединений. Испытывались стыковые сварные соединения из сталей марок Ст.3 и 30ХГСА различной прочности ( $\sigma'_6 = 40 \dots 170 \text{ кгс/мм}^2$ ), размером 250x32xII мм, термообработанных после сварки, такие же соединения

из термоупрочненной стали без термообработки после сварки и соединения с угловыми швами (с приваренными по контуру накладками, термоупрочненные после сварки, размером 250x40x11 мм (размер накладок 60x10x10 мм).

Результаты усталостных испытаний сварных соединений, а также сходимость расчетных и опытных пределов выносливости соединений, термоупрочненных после сварки, приведены в табл. I.

Таблица I

Марка стали	Термо-обработка	$\sigma_{\text{б}}^{\text{c}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Пределы выносливости, кгс/мм <sup>2</sup>					
			стыковые			с накладками		
			расч.	опыт.	$\Delta$ , %	расч.	опыт.	$\Delta$ , %
Ст.Зсп	Норм.	40	9,5	9,0	+1,55	9,3	8,7	+6,9
30ХГСА	-" -	70	10,2	12,0	-17,7	10,6	13,5	-2,0
-" -	3+0tp. 600°C	90	11,5	13,0	-11,5	12,2	14,0	-12,8
-" -	3+0tp. 400°C	130	13,2	13,0	+1,5	13,3	13,7	-2,3
-" -	3+0tp. 200°C	170	16,6	16,5	+1,8	15,6	13,0	+2,0

Сравнение сходимости расчетных пределов выносливости стыковых сварных соединений из термоупрочненной до сварки стали 30ХГСА приведено в табл. 2. Разрушение образцов происходило по твердому участку з.т.в., имевшего твердость HV<sub>T</sub> в месте расположения концентратора напряжений, создаваемого валиком.

Таблица 2

$\sigma_{\text{б}}^{\text{c}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	HV <sub>M</sub>	HV <sub>T</sub>	$(\sigma_{-1\kappa}^{\infty})_{\text{расч.}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$(\sigma_{-1\kappa}^{\infty})_{\text{опт.}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\Delta$ , %
90	240	459	14,2	15,0	-5,6
170	335	500	18,6	17,0	+8,6

На рис. 5 представлено сопоставление расчетных по предлагаемой методике пределов выносливости стыковых сварных соединений с опытными по данным В.И. Труфякова. Видно, что для образцов различных размеров из сталей различной прочности, сходимость расчетных и опытных пределов выносливости удовлетворительная.

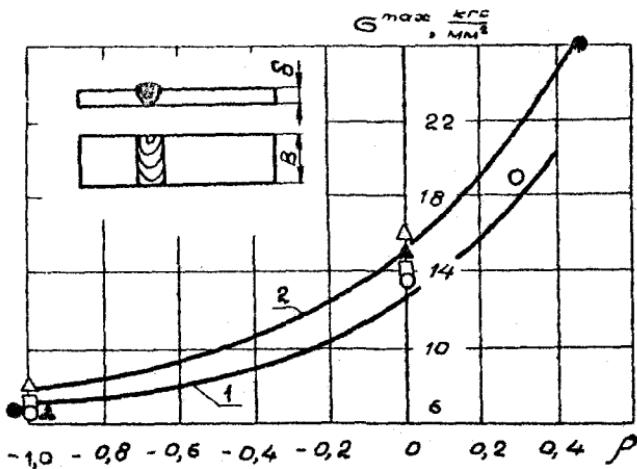


Рис.5. Сравнение расчетных (сплошная линия) пределов выносливости сварных соединений с опытными:

- I - малоуглеродистая сталь ( $B = 200$  мм,  $\delta = 30$  мм);  
 2 - низколегированные стали ( $B = 30-50$  мм,  $\delta = 10-12$  мм);  
 (○ - M16C, □ - 10ХНД, ● - 14ХМНДР, ▲ - 10Г2СД, Δ - 09Г2С)

Для оценки влияния остаточных напряжений на выносливость сварных соединений испытывались образцы размером 500x80x16 мм с пересекающимися швами из стали марки 30ХГСА. Использованы также опытные данные ряда авторов. Результаты испытаний и сравнительная оценка расчетных и опытных значений пределов выносливости приведены в табл.3.

Таблица 3

Марка стали	Состояние образцов	$\rho$	$\sigma_{pk}$ , кгс/мм <sup>2</sup>		$\Delta = \frac{\sigma_{pk}}{\sigma_{pk}^{расч.}}$	Примечание
			расч.	опыт.		
Ст M16C	после сварки	-I	7,5	6,6	-I2,0	В.И.Труфяков
10G2CI	после сварки	-I	8,5	7,4	-I3,0	О.А.Бакши и др.
"	после сварки	0	14,5	13,6	-6,0	"
"	после отпуска	-I	II,2	10,0	-II,0	"
"	после отпуска	0	16,0	16,4	+2,0	"
30ХГСА	после сварки	-I	7,0	7,9	+I4,0	Автор
"	после отпуска	-I	12,0	14,0	+I6,0	Автор
Ст.3	после сварки	-I	7,1	6,6	-7,0	Н.А.Клыков
"	после отпуска	-I	II,2	12,0	+8,0	"

Из приведенных данных следует, что расчетная методика удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

С помощью разработанной методики выполнен анализ влияния прочности стали, концентрации напряжений, повышения свойств металла околосвободной зоны и остаточных напряжений на предел выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей.

Установлено, что:

1) у сварных соединений из высокопрочных сталей, хотя их чувствительность к надрезу больше, предел выносливости  $C_{-1K}$  остается все же выше, чем у малоуглеродистых, независимо от величины  $\alpha_e$ ;

2) повышение прочностных свойств металла околосвободной зоны сварных соединений за счет термического цикла сварки повышает и его чувствительность к надрезу.

Однако последнее не является основной причиной относительно резкого снижения предела выносливости соединений из высокопрочных сталей, поскольку при отсутствии остаточных напряжений они при любом значении  $\alpha_e$  остаются больше пределов выносливости таких же соединений из малоуглеродистых сталей;

3) относительное влияние остаточных напряжений на выносливость сварных соединений мало зависит от химического состава стали и более существенно от концентрации напряжений, масштабного фактора и скорости охлаждения при сварке.

Для сталей  $C_e \leq 0,5\%$  при  $\epsilon_e = 1,0$  ( $F \leq 400 \text{ мм}^2$ ) относительное влияние остаточных напряжений на предел выносливости сварных соединений при изменении  $\alpha_e$  в пределах 1...7 колеблется от 45 до 65%, а при  $0,5 < C_e \leq 1,0\%$  от 60 до 75%; при  $\epsilon_e = 0,64$  ( $F > 4000 \text{ мм}^2$ ) отрицательное влияние остаточных напряжений растяжения увеличивается до 60...68%, при  $C_e = 0,5\%$  и до 65...80% при  $0,5 < C_e \leq 1\%$ ;

4) основной причиной различного соотношения пределов выносливости сварных соединений из высокопрочных и малоуглеродистых сталей является отрицательное влияние остаточных напряжений растяжения, величина которых зависит от коэффициента  $\alpha_e$  и масштабного фактора. При  $\alpha_e > 2,0 \dots 2,5$ , для образцов больших размеров ( $F \geq 4000 \text{ мм}^2$ ), вследствие большего отрицательного влияния остаточных напряжений, предел выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей может оказаться ниже предела выносливости аналогич-

ных соединений из малоуглеродистых сталей. При меньших  $\alpha_{\text{в}}$  и F , наоборот, предел выносливости соединений из высокопрочных сталей имеет большие значения, чем соединения из малоуглеродистых сталей.

Относительное снижение пределов выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей за счет концентрации напряжений, дефектов в поверхностном слое, остаточных напряжений и других факторов больше, чем соединений из малоуглеродистых сталей.

Поэтому на эффективность использования сталей высокой прочности для сварных конструкций, будет оказывать влияние применение способов повышения выносливости последних.

Одним из эффективных способов повышения выносливости сварных соединений является поверхностное пластическое деформирование (ППД) наиболее полно изученных И.В.Кудрявцевым с сотрудниками.

В диссертации испытывались образцы из основного металла и стыковых сварных соединений после дробеструйного наклена. Наклен осуществлялся дробью  $d = 0,8...1,0$  мм при скорости потока дроби 60 м/сек и времени наклена 2 мин.

Повышение выносливости в сравнении с выносливостью аналогичных образцов без наклена приведено в табл.4.

Таблица 4

Характеристика образцов	$\sigma_g$ , основного металла, кгс/мм <sup>2</sup>				
	40	70	90	130	170
Повышение предела выносливости, %					
Основной металл:					
а) гладкие образцы	166	159	125	112	115
б) с отверстием ( $\alpha_{\text{в}} = 2,3$ )	180	172	136	137	130
Сварные соединения:					
а) термоупрочненные после сварки	200	196	185	170	145
б) из термоупрочненных сталей	-	-	180	-	130

Установлено, что наклон является эффективным способом повышения выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей с прошитой поверхностью.

В четвертой главе "Использование результатов исследований при проектировании сварных конструкций", представлены результаты практического использования методики расчета выносливости сварных конструкций.

Результаты усталостных испытаний подтвердили возможность использования методики для расчета выносливости реальных сварных конструкций.

Расчетная методика была применена при проектировании штампо-сварных картеров ведущих мостов трехосных автомобилей "Урал" из высокопрочных сталей марок 17ГС, 25ХГСА и 30ХГСА взамен серийных лито-сварных с целью снижения их веса и повышения технологичности.

Дорожные испытания, выполненные Уральским автомобильным заводом на автомобилях марки "Урал-375 Д" при пробеге 86-173 тыс.км. по различным видам дорог показали высокие служебные свойства предложенных конструкций картеров. При этом усталостных разрушений не обнаружено.

В результате проведенных совместно с заводом исследований выбраны марки сталей (25ХГСА для картеров передних мостов и 30ХГСА для задних) и разработаны новые конструкции штампо-сварных картеров. Достигнуты следующие показатели экономической эффективности: снижение веса - задних картеров на 40 кг, передних на 20 кг ; веса исходных материалов на 33% ; снижение затрат на материалы на 34% ; себестоимости на 43%.

Условная годовая экономия средств от замены лито-сварных картеров средних и задних ведущих мостов автомобилей "Урал" штампо-сварными с учетом затрат на капитальное строительство участка и приобретение нового оборудования по данным завода составляет около 4 млн.руб.

Штампо-сварные картеры автомобилей "Урал" приняты к внедрению и в настоящее время используются для отработки конструкций ряда перспективных марок автомобилей "Урал".

На основе проведенных исследований концентрации напряжений и оценки коэффициента запаса с учетом влияния прочности стали, концентрации напряжений, масштабного фактора, режимов сварки и остаточных напряжений разработаны рекомендации, направленные на повышение выносливости и улучшение технологичности изготовления динамического стенда ДС-15000 для одной из организаций.

Выполненные исследования показали возможность отказа от термообработки предусмотренной проектом, что позволило снизить трудоемкость сборки и сварки стенда, а конструктивные изменения позволили повысить запас прочности. Экономический эффект от внедрения рекомендаций только по одной из четырех секций стенда ДС-15000 составил 52 тыс.руб.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработаны формулы для оценки пределов выносливости высокопрочных сталей с временным сопротивлением 40...180 кгс/мм<sup>2</sup>, учитывающие чистоту обработки поверхности и размеры поперечного сечения. Установлено, что выносливость сталей с прокатной поверхностью повышается с увеличением прочности стали.

2. Основную роль в снижении выносливости сталей с прокатной поверхностью играет обезуглероживание металла поверхностного слоя и наличие в нем дефектов, как концентраторов напряжений.

3. Чувствительность к надрезу  $\alpha_g$  сталей с прокатной поверхностью с повышением прочности достигает максимума при  $\sigma_g = 120-140$  кгс/мм<sup>2</sup>, а затем убывает. У сталей с обработанной поверхностью чувствительность к надрезу выше, чем у сталей с прокатной поверхностью вследствие наличия у последних поверхностного обезуглероженного слоя.

4. Пределы выносливости основного металла высокопрочных сталей, несмотря на их повышенную чувствительность к надрезу, при любом значении коэффициента концентрации напряжения в интервале  $1 < \zeta_g < 7$  выше пределов выносливости основного металла малоуглеродистых сталей как при отсутствии, так и наличии остаточных напряжений растяжения, равных  $\sigma_t$ .

5. Разработан инженерный метод приближенной расчетной оценки выносливости основного металла и сварных соединений, учитывающий влияние прочности, размера образцов, остаточных напряжений, режимов сварки и химического состава стали без проведения усталостных испытаний. Метод позволяет производить оценку предельных и допускаемых напряжений для сварных соединений и конструкций, работающих на усталость, при линейном растяжении (сжатии) и при изгибе,

и применим как к соединениям из предварительно термоупрочненных сталей, так и к соединениям в конструкциях, прошедших термообработку после сварки.

6. Экспериментальная проверка показала удовлетворительную сходимость опытных и расчетных значений пределов выносливости для основного металла и сварных соединений (стыковых, с угловыми и пересекающимися швами) при наличии и отсутствии остаточных напряжений.

7. Чувствительность металла околосшовной зоны конструкционных малоуглеродистых и низколегированных сталей с прочностью 40...  
...180 кгс/мм<sup>2</sup>, при скоростях охлаждения при сварке  $W > 2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  выше, чем у основного металла. Однако, несмотря на это, пределы выносливости металла околосшовной зоны при отсутствии остаточных напряжений растяжения выше, чем у основного металла при значениях  $\alpha_e = I...7$ .

8. Степень отрицательного влияния остаточных напряжений растяжения на предел выносливости сварных соединений зависит от концентрации напряжений, эквивалентного содержания углерода  $C_e$ , масштабного фактора и скорости охлаждения при сварке  $W$ .

У сварных соединений из стали с величиной  $C_e = 0,5\%$  при изменении коэффициента  $\alpha_e$  в пределах  $I...7$ ,  $W = 2...100^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и  $F = 400...4000 \text{ мм}^2$  величина относительного влияния остаточных напряжений  $\Delta_o$  изменяется, примерно, от 45 до 65%, а у сталей с  $0,5 \leq C < 1,0\%$  – примерно от 60 до 80%.

9. Основной причиной того, что в некоторых случаях пределы выносливости сварных соединений из высокопрочных сталей оказываются ниже предела выносливости аналогичных соединений из малоуглеродистых сталей является концентрация напряжений и повышенное отрицательное влияние остаточных напряжений растяжения.

При высоких скоростях охлаждения во время сварки вследствие повышения предела текучести металла околосшовной зоны значительно возрастают остаточные напряжения растяжения, отрицательное влияние которых при  $\alpha_e > 2,0...2,5$  и может привести к тому, что отношение пределов выносливости сварных соединений из высокопрочных и малоуглеродистых сталей окажется меньше единицы.

10. Поверхностный наклеп является эффективным способом повышения выносливости высокопрочных сталей с прокатной поверхностью

и сварных соединений из них. При этом может быть достигнута равнопрочность стыковых сварных соединений и основного металла.

II. Результаты работы использованы при проектировании штампо-сварных взамен лито-сварных картеров ведущих мостов трехосных автомобилей "Урал" на Уральском автомобильном заводе.

Переход на новую конструкцию картеров ведущих мостов автомобилей "Урал" обеспечивает экономический эффект свыше 4 млн. рублей.

Изменение конструкции и технологии изготовления динамического стенда ДС-15000, выполненные на основе работы, позволило получить экономический эффект 52 тыс. рублей.

12. Изложенные в работе примеры практического использования высокопрочных сталей для производства сварных конструкций и методика расчетной оценки их выносливости позволяют рекомендовать ее для широкого использования при проектировании сварных конструкций из этих сталей, работающих на усталость. Это позволит снизить вес и стоимость сварных конструкций и сократить сроки их проектирования.

Основные положения диссертации докладывались на конференциях и семинарах в гг. Киеве, Свердловске, Ленинграде, Курске, Ижевске и Челябинске и опубликованы в следующих работах автора:

1. Ачинович Н.Н. Влияние остаточных напряжений на выносливость сварных соединений из сталей повышенной прочности. - "Автоматическая сварка", 1973, № II.

2. Ачинович Н.Н., Журавлева Р.С. О влиянии прокатного поверхностного слоя на выносливость образцов из термоупрочненных сталей. В сб. "Вопросы сварочного производства", № 139, Челябинск, ЧПИ, 1974.

3. Бакши О.А., Клыков Н.А., Ачинович Н.Н., Решетов А.Л., Непомнящий Я.Р., Голубов Г.П., Наумов В.И., Титков А.И. Усталостная прочность штампо-сварных картеров задних ведущих мостов автомобилей "Урал". - "Автоматическая сварка", 1973, № 6.

4. Бакши О.А., Клыков Н.А., Ачинович Н.Н., Непомнящий Я.Р., Голубев Г.П., Наумов В.И. Применение высокопрочных сталей для штампо-сварных картеров ведущих мостов автомобилей "Урал". В сб. ЦНИИИФМТЦ им. ГО-73-12, М., 1973.

5. Бакши О.А., Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. Исследование усталостной прочности сварных соединений из термоупрочненной стали марки ЗОХГСА. В сб. "Прогрессивные способы сварки и напыления металлов". Курск, ЧИИ, 1972.
6. Бакши О.А., Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. О влиянии режимов сварки на усталостную прочность металла околосшовной зоны сварных соединений из низколегированных сталей. В сб. "Сварные металлоконструкции и их производство", № 100, Челябинск, ЧИИ, 1972.
7. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. Усталостная прочность сварных соединений из низколегированных сталей. В сб. "Материалы XXIII научно-технической конференции института", Челябинск, ЧИИ, 1970.
8. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н., Решетов А.Л. Приближенная оценка чувствительности к надрезу при циклических нагрузках металла зон сварных соединений. В сб. "Материалы XXIII научно-технической конференции института". Челябинск, ЧИИ, 1970.
9. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. О влиянии режимов сварки на усталостную прочность сварных соединений. В сб. "Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций", № 42. Изд-во ПДНТИ, Ленинград, 1970.
10. Клыков Н.А., Романов Е.С., Решетов А.Л., Ачинович Н.Н. Предельное условие усталостной прочности с учетом эффективности нормальных напряжений. В сб. "Динамика, прочность и долговечность деталей машин", Ижевск, 1971.
11. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. Чувствительность к концентрации напряжений металлов с прокатной поверхностью применяемых для сварных соединений. В сб. "Сварные металлоконструкции и их производство", № 100, Челябинск, ЧИИ, 1972.
12. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. Исследование усталостной прочности сварных соединений стали марки ЗОХГСА с термоупрочнением до и после сварки. В сб. "Вопросы сварочного производства", № 139, Челябинск, ЧИИ, 1974.
13. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н. Чувствительность металла сварных соединений к концентрации напряжений. В сб. "Прочность сварных соединений и конструкций при переменных нагрузках", Челябинск, ЧИИ, 1974.

14. Клыков Н.А., Ачинович Н.Н., Зайцев Н.Л., Сидамин В.П., Непомнящий Я.Р. Исследование концентрации напряжений в штампо-сварных картерах ведущих мостов автомобилей "Урал". В сб. "Вопросы сварочного производства", № 139, Челябинск, ЧПИ, 1974.

По теме диссертации сделаны следующие доклады:

1. На Всесоюзном семинаре: "Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций", Ленинград, 1970 г.
2. На XXIII-XXVII научно-технических конференциях института, Челябинск, 1970-1975 гг.
3. На научно-технической конференции сварщиков Урала "Прогрессивные способы сварки, новые материалы и конструкции в сварочном производстве", Ижевск, 1972 г.
4. На IV Всеобщем совещании по применению в машиностроении конструкций из низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести 60-90 кгс/мм<sup>2</sup>, Киев, 1973 г.
5. На Всесоюзной конференции: "Прогрессивные способы сварки и напыления металлов", Курск, 1972 г.
6. На Всесоюзном семинаре: "Прочность сварных соединений и конструкций при переменных нагрузках", Челябинск, 22-23 мая, 1974 г.

Технический редактор А.В.Миних

---

ФБ 01597. Подписано к печати 13/XI-75 г. Формат бумаги 60x90/16.  
Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧПИ. Тираж 120 экз.  
Заказ № 368/1467.