

6
A-65

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

НИКИШИНА М. Л.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ НА ВЯЗКУЮ
И ХРУПКУЮ ПРОЧНОСТЬ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ**

НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

(01.022 — Сопротивление материал
и строительная механика)

Ленинград



1971

На правах рукописи

НИКИШИНА М.Л.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ НА ВЯЗКУЮ
И ХРУПКУЮ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ

На русском языке

(01.022 – сопротивление материалов
и строительная механика)

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

Ленинград

1971



А65 2

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов Ленинградского ордена Ленина кораблестроительного института.

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор В.А.БЫКОВ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук доцент В.В.КОЗЛЯКОВ
кандидат технических наук
ст.научн.сотр. И.А.РАЗОВ

Ведущее предприятие - Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения.

Автореферат разослан "11" декабря 1971 г.

Защита диссертации состоится "31" января
1972 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней факультета корабельной энергетики Ленинградского ордена Ленина кораблестроительного института по адресу: Ленинград, Ф-8, ул.Лопманская, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института за 10 дней до защиты.

Отзывы и замечания в двух экземплярах просим направлять в указанный адрес.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
канд.техн.наук доцент

РАЛЬЦЕВИЧ Н.В.

В В Е Д Е Н И Е

Директивами по пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1971-75 гг., принятыми на XXIV съезде КПСС, предусмотрено дальнейшее развитие судостроительной, авиационной, химической, энергетической, нефтяной и других отраслей промышленности. При этом первостепенное значение имеет проблема обеспечения долговечности и надежности работы конструкций при экономически целесообразных сроках их службы.

Материалы конструкции судна, а также многих деталей судовых и береговых перегрузочных устройств и механизмов испытывают действие циклических напряжений и могут работать в условиях низких температур. Накопление повреждений под действием циклических нагрузок вызывает значительное снижение хрупкой прочности стали, что отрицательно влияет на продолжительность межремонтных сроков службы конструкций, а в некоторых случаях оказывается причиной аварий. Поэтому весьма актуальным представляется исследование хрупкой прочности, в связи с усталостью на основе современных разработок по механике разрушения. Такого рода исследование направляется на установление новых экспериментальных характеристик, позволяющих специалистам увереннее назначать предпочтительные стали из числа конкурирующих, а также находить основу для разработки расчета прочности в целях предупреждения заданного эксплуатационного повреждения и трещинообразования, что совершенно не охватывается общеизвестными традиционными методами.

По-видимому, для судокорпусных конструкций усталость, в общеизвестном представлении, не может быть более важной проблемой, чем проблема хрупких разрушений. Это объясняется тем, что трещины усталости в обычных условиях эксплуатации, при низком уровне действующих в корпусе судна напряжений, развиваются медленно, могут быть своевременно обнаружены и лока-

4
лизваны. Иначе проявляется усталость вследствие кратковременных перегрузок. Такие перегрузки вызывают малоцикловое повреждение с оопутствующим охрупчиванием стали. В последнем случае не исключено неожиданное возникновение хрупкой трещины. Для указанной трещины характерно мгновенное распространение. Хрупкая трещина может достигнуть угрожающих размеров, а при неблагоприятных условиях эксплуатации привести к разрушению конструкции под действием незначительной нагрузки, например, при низкой температуре, при ударе. Для корпусных конструкций хрупкие разрушения, инициируемые трещинами малоциклового усталости (МЦУ), становятся особенно опасными в связи с увеличением тоннажа судов, повышением общего уровня напряженности конструкций в результате тенденции к облегчению их веса и уменьшению размеров связей. Характерными признаками малоциклового усталости, развивающейся под действием кратковременных циклических перегрузок, служат пластические деформации, а также низкая частота от нескольких десятков циклов в минуту до одного или менее цикла в сутки. Разрушение от малоциклового усталости наступает при небольшой долговечности, составляющей менее 2×10^5 циклов (по ГОСТу 2860-65).

Область МЦУ представляет значительный интерес поскольку в докладах исследователей на международных конгрессах по прочности судов показано, что уже после сравнительно небольшого периода эксплуатации (3-4 года) в корпусах судов, у концентраторов напряжения, в резких переходах сечений, в местах нарушения непрерывности связей, в зоне дефектов металла и в несправках сварных швов возникают трещины небольших размеров, свидетельствующие о малоцикловом повреждении.

В данной диссертационной работе исследуется охрупчивание конструкционных судостроительных сталей на крупногабаритных образцах под влиянием малоциклового повреждения.

I. Охрупчивающее влияние малоциклового усталости

Обобщенные данные отечественных и зарубежных исследователей свидетельствуют об изменении механических свойств материалов в процессе МЦУ. Заметно изменяются предел текучести, относительное удлинение при растяжении и, особенно, способность деформироваться пластически при жестко напряженных состояниях, в чем можно убедиться при испытаниях надрезанных

образцов.

5
Наибольшие изменения механических свойств происходят в первые циклы нагружения, последующие же циклы вносят меньшее изменение. Изменение пластичности материалов и повышение склонности к хрупкому разрушению под влиянием усталостного повреждения в большинстве исследований изучалось экспериментально, в основном по данным ударного изгиба небольших образцов, вырезанных из циклически поврежденных заготовок. При этом поврежденные циклической деформацией поверхностные слои могли частично удаляться, чем и объясняется различие заключений разных исследователей по малоцикловому повреждению.

Относительно причин охрупчивания поврежденных материалов сложились разные мнения. Часть исследователей считает, что основной причиной охрупчивания служит появление видимой трещины усталости. Большинство же исследователей придерживается мнения, что охрупчивание происходит еще до появления трещины из-за накопления субмикроскопических нарушений сплошности и разрыхления металла. Некоторые исследователи оценивают малоцикловое усталостное повреждение повышением критической температуры хрупкости, которая в соответствии со схемой Иoffee-Давиденкова, происходит из-за повышения предела текучести и снижения хрупкой прочности конструкционной стали. Ряд авторов считает, что критическая температура хрупкости повышается при напряжениях выше пределов усталости, при перегрузках; другие полагают, что это может происходить и при напряжениях ниже предела усталости, т.е. даже при недогрузках. Данные по величине повышения критической температуры хрупкости в зависимости от уровня напряжений и длительности испытаний значительно отличаются между собой. Так, повышение критической температуры хрупкости стали t_k у одних исследователей составляло $10-20^\circ\text{C}$, а у других достигало 60°C . Приведенные выше данные свидетельствуют о недостаточной изученности вопроса охрупчивания металлов под влиянием малоциклового усталости.

II. Цель и содержание исследования

Целью исследования являлось изучение охрупчивания конструкционных сталей, применяемых в судостроении, под влиянием малоциклового усталости на крупногабаритных образцах с рабочей толщиной проката, для получения более контрастных

убедительных результатов, чем на небольших образцах. Работа содержала следующие этапы:

1. Выбор исследуемых конструкционных сталей.
2. Разработка типа образца, удовлетворяющего целям исследования.
3. Разработка методики эксперимента, обеспечивающего накопление малоциклового повреждения, а также установление признака и оценки повреждения материала того же образца.
4. Проведение эксперимента, установление кривых малоциклового усталости, определение характеристик прочности неповрежденных и поврежденных образцов при вязком и хрупком состоянии, а также отличительных признаков разрушения при указанных предельных состояниях.
5. Сравнительная оценка исследованных сталей по их способности противостоять малоциклового повреждению.

Для решения намеченной цели были привлечены методы исследования физического металловедения (определение микротвердости), оптический — для изучения распределения напряжений, изучение кинетики трещин при малоциклового усталости, фрактографическое исследование макроструктуры излома поврежденных и неповрежденных образцов при вязком и хрупком разрушении, а также макроструктуры излома от малоциклового усталости.

III. Исследуемые материалы. Методика экспериментов

В соответствии с целями и содержанием исследования проводились следующие серийные испытания крупногабаритных образцов при возбуждении номинальных напряжений выше предела текучести.

1. Отнулевое внецентренное растяжение в условиях комнатной температуры до образования трещины усталости. Отмечались предельные нагрузки и циклические долговечности для построения кривых малоциклового усталости, изучалась кинетика трещин.

2. Отнулевое внецентренное растяжение при комнатной температуре для накопления малоциклового повреждения без образования трещин, с определением твердости по Виккерсу по мере нарастания числа циклов.

3. Один цикл внецентрального сжатия при комнатной температуре в целях возбуждения неблагоприятных остаточных напря-

жений и структурных повреждений после однократного пластического деформирования.

4. Статическое внецентренное растяжение до разрушения при комнатной температуре и охлаждении вплоть до глубокого холода образцов неповрежденных и поврежденных при разных числах циклов отнулевого растяжения и при однократном сжатии.

Определялись наибольшие нагрузки, остаточные сужения толщин образцов, макроструктура изломов, данные по кинетике излома, критические температуры перехода сталей из состояний вязкого в полухрупкое, а затем в хрупкое.

Исследуемыми материалами служили: углеродистая сталь марки Ст.3 и низколегированные стали марок 09Г2 и СХЛ-4. Состояние поставки, толщина листов, химический состав и механические свойства сталей соответствовали техническим условиям и ГОСТу 5521-67 (табл. I).

Из листов вырезались плоские надрезанные образцы с сохранением поверхности проката. Образцы имели размеры 150×120 мм, глубина надреза составляла 50 мм, радиус скругления 1 мм. По мнению многих исследователей испытание таких образцов на внецентренное растяжение близко воспроизводит деформирование и разрушение материала листовой стали в корпусе корабля, в резервуарах, в котлах, в газгольдерах, в трубопроводах и в других металлоконструкциях.

Внецентренное растяжение ставит материал принятых плоских образцов в условия более жесткой напряженности, чем при изгибе, поскольку при внецентренном растяжении, благодаря продольной нагрузке, отсутствует давление между волокнами и нет касательных напряжений изгиба из-за отсутствия поперечной силы. Вблизи надреза затрудняется развитие деформации материала образца и возникает объемное напряженное состояние с растягивающими главными напряжениями $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$. Вследствие сближения крайних главных напряжений величина $\sigma_{\text{ср}} = \sigma_1 - \sigma_3$ относительно невелика и при внецентренном растяжении надрезанных образцов возбуждается жесткое напряженное состояние, в условиях которого пластическая деформация наступает при повышенных главных напряжениях.

С помощью метода фотоупругости исследовалось распределение напряжений от внецентрального растяжения на прозрачных моделях плоских образцов, изготовленных из оптически активного материала. О неравномерном распределении напряжений при

Таблица 1

Сталь марки	Толщина листа, мм	Состояние поставки	Химический состав, %								Механические свойства			
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	σ_T , кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	δ_5 , %	ψ , %
Ст.3	14	После проката	0,19	0,02	0,45	0,016	0,046				19	39	31	50
09Г2	20	Закалка высокой отпуск	0,12	0,29	1,59	0,031	0,018	0,10	следы	0,09	30	45	20	54
СХЛ-4 (ЮХСНД)	13,5	Горячекатаная	0,12	0,84	0,64	0,02	0,035	0,85	0,53	0,52	42	53	23	60

наличии надреза в зоне упругих деформаций плоского образца свидетельствует полученная картина изохром, состоящая из криволинейных полос, резко сгущающихся у дна надреза. Каждая из полос является геометрическим местом точек, имеющих одну и ту же величину наибольших касательных напряжений или разностей главных напряжений $\sigma_{II} = \sigma_1 - \sigma_3$. Изохромы указывают направления разрыва материала образцов в случае перенапряжения.

Повторное отнулевое внецентренное растяжение образцов производилось на машине ГМС-50. Частота нагружения составляла 4-5 циклов в минуту, что исключало заметное нагревание образцов в процессе МЦУ и была близка к частоте при качке судна на море. Предельная долговечность определялась распространением трещины усталости на расстоянии 40 мм. Кинетика развития трещин изучалась при помощи микроскопа МИР-2. Было замечено, что в начальной стадии процесса МЦУ трещина развивается медленно и с остановками, длящимися по несколько десятков циклов. При этом число циклов до полного разрушения плоского образца N_p значительно превышает число циклов до образования трещины $N_{тр}$.

Обнаружено, что для сталей исследуемых марок при номинальных напряжениях выше предела текучести появление видимой трещины усталости происходит в течение не более чем 1000 циклов. По кривым малоциклового усталости взяты повреждающие нагрузки P_n и соответствующие им предельные долговечности до $N < 1000$ циклов, а затем произвольно назначены числа повреждающих циклов $n_1 < n_2 < \dots < N$ (табл.2).

Таблица 2

Сталь марки	P_n	Число циклов				
		N	n_1	n_2	n_3	n_4
Ст.3	6000	750	100	200	400	600
09Г2	13000	663	250	400		
СХЛ-4	9000	944	400	600		

Повреждающие нагрузки P_n сравнительно с наибольшей нагрузкой статического разрыва P_B составляли: для образцов из стали Ст.3 $P_n = 0,56 \cdot P_B = 6$ т; из стали 09Г2 $P_n = 0,7 \cdot P_B = 13$ т; из стали СХЛ-4 $P_n = 0,62 \cdot P_B = 9$ т.

Наибольшая нагрузка статического разрыва P_0 принята соответствующей $N = 1/2$ цикла.

Усталостному повреждению подвергались две серии образцов из сталей марок СХЛ-4 и 09Г2 при пробегах $n_1 = 0,4 N$, $n_2 = 0,6 N$, а также четыре серии образцов из стали марки Ст.3 при пробегах $n_1 = 0,13 N$; $n_2 = 0,27 N$; $n_3 = 0,54 N$; $n_4 = 0,86 N$, где N — число циклов до разрушения. Для образцов из стали в исходном состоянии, а также после 1, 10, 100 циклов отнулевого внецентренного растяжения измерялась твердость по Биккерсу H_V в области наибольшего развития пластической деформации вблизи дна надреза. С возрастанием числа циклов твердость сталей повышалась и по изменению твердости стали оказались циклически упрочняющимися. Наиболее интенсивное упрочнение наблюдалось после первого цикла, причем заметнее у стали углеродистой, чем низколегированной.

Под действием однократного внецентренного сжатия противоположные стороны надреза сближались, а радиус округления дна надреза несколько уменьшался. Ограничение внецентренного сжатия одним циклом представляется обоснованным, поскольку повторные нагрузки сжатия, из-за сближения сторон надреза, не могли быть эффективными. К тому же известно, что наибольшее изменение механических свойств стали происходит после первого цикла нагружения. Нагрузка внецентренного сжатия составляла $0,9 P_0$; после сжатия измерялась относительная деформационная характеристика локального расширения образца в надрезе ($\frac{\Delta b}{b_0}$).

Образцы в исходном состоянии, а также поврежденные циклическим внецентренным растяжением и однократным сжатием испытывались на внецентренное растяжение до разрыва при комнатной температуре и охлаждении. Для охлаждения образцов использовалась термоизоляционная ванна, наполненная жидким азотом или смесью жидкого азота и бензина. Образцы выдерживались в криостатной ванне при заданной температуре не менее 20 минут для достижения температуры охлажденной смеси. Температуру образцов до -196°C устанавливали по прекращению кипения в ванне жидкого азота и измерением контактной хромель-копелевой термопарой. Температура образцов до -120°C контролировалась дополнительно пентановым термометром. Согласно опыту, при переносе, установке образца в захват машины и в

процессе излома изменение температуры составляло 10°C , которое компенсировалось соответствующим предварительным переохлаждением образцов в ванне. Для каждого образца определялась наибольшая нагрузка, сужение толщины $\frac{\Delta b}{b_0}$, вид и макроструктура излома, оценивалась скорость распространения излома.

17. Экспериментальные данные и их обработка

Данные испытаний плоских образцов на отнулевое внецентренное растяжение до возникновения трещин усталости и их распространение на расстояние до 40 мм использованы для построения кривых усталости. Последние линейризовались в полулогарифмических координатах, представляющих повреждающую нагрузку и циклическую долговечность в границах $0,5 \leq N \leq 7000$ циклов. Линейризованные графики малоциклового усталости представлены на рис.1, причем для сравнимости свойств разных сталей предельные нагрузки разделены на толщину образцов.

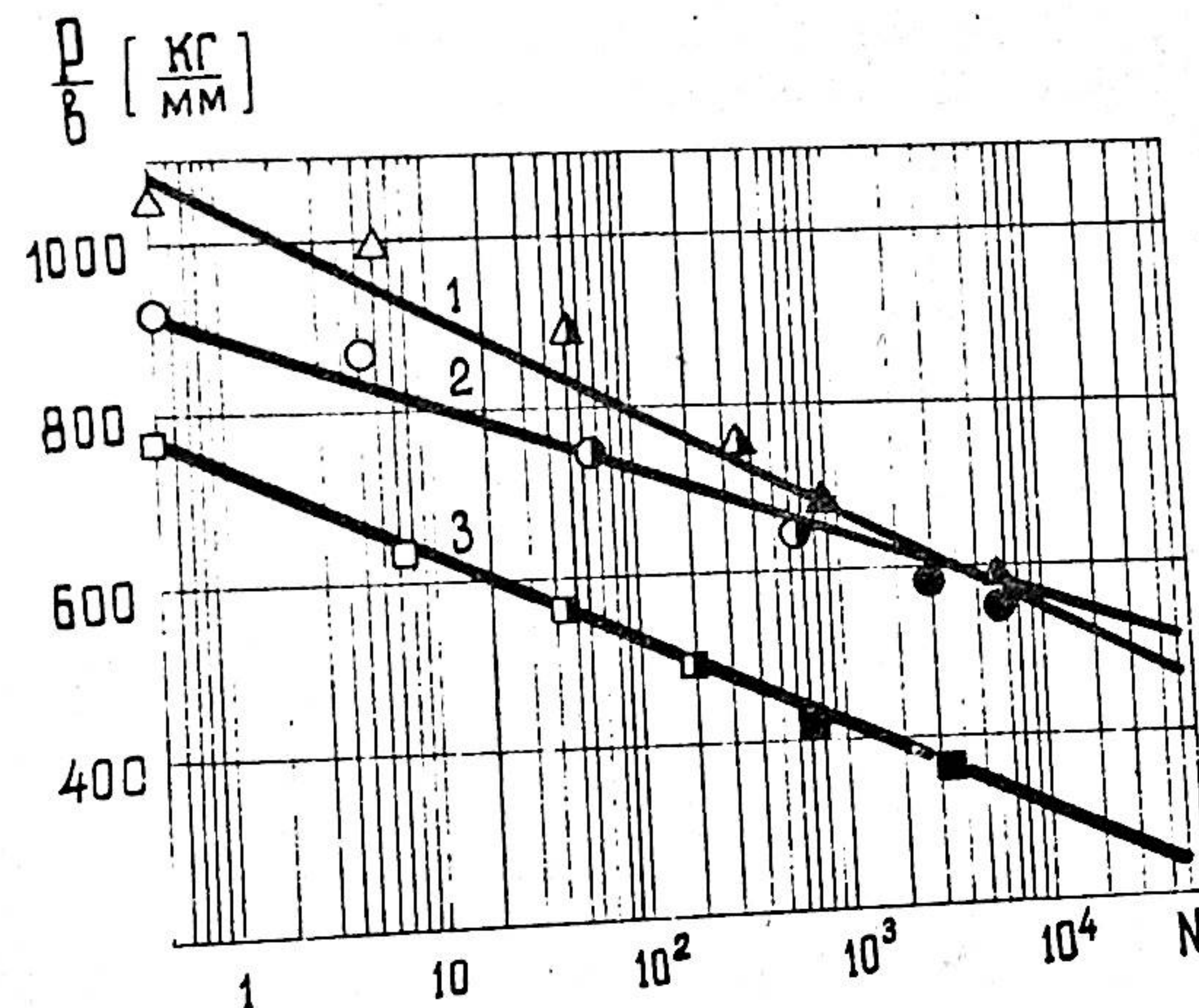


Рис.1. Кривые малоциклового усталости для сталей марок: 1 — СХЛ-4; 2 — 09Г2; 3 — Ст.3. (Светлые значки — квазистатическое разрушение, зачерченные — усталостное, зачерченные наполовину — переходное)

Для предсказания долговечности в области МЦУ методом наименьших квадратов, на счетной машине типа КЕЛР-2с Рейнметалл была найдена корреляционная зависимость между повреждающей нагрузкой P_n кг и долговечностью N , выражавшаяся каждой из исследуемых марок сталей следующим уравнением:

$$\text{для стали марки Ст.3} \quad P_n = 10411 - 1520 \lg N \quad (1)$$

$$\text{для стали марки СХЛ-4} \quad P_n = 14671 - 1816 \lg N \quad (2)$$

$$\text{для стали марки 09Г2} \quad P_n = 18351 - 1916 \lg N \quad (3)$$

Деформационные, прочностные и другие характеристики статического испытания при комнатной и пониженных температурах внецентренно разорванных образцов из сталей марок Ст.3, 09Г2 и СХЛ-4 приведены в табл.3,4 и 5 соответственно. В результате этих испытаний для стали каждой марки выявилось три состояния: вязкое, полухрупкое, хрупкое, разделенные двумя критическими температурами t_{k1} и t_{k2} . Критическая температура t_{k1} разделяла вязкое и полухрупкое состояния стали, критическая температура t_{k2} разделяла полухрупкое и хрупкое состояние стали. Для каждого состояния сталей оказались характерными вид диаграммы внецентренного растяжения образца до разрыва, процесс деформирования и разрушения, расположение излома и вид его макроструктуры, величина пластической деформации, энергия разрушения.

а) Для вязкого состояния стали характерна диаграмма $P - \Delta l$ внецентренного растяжения с восходящим левым и нисходящим правым участками, свидетельствующими о возрастании сопротивления образца до максимума с последующим постепенным снижением до небольшой величины. При вязком состоянии стали для распространения трещины до полного излома требуется большое количество энергии. Обнаруживается высокое сопротивление деформированию вследствие упрочнения стали и перераспределения напряжений, а также высокое значение сужения у надреза $\frac{\Delta b}{b_0}$, постепенное распространение излома с небольшой скоростью и большая работа для распространения трещины. Макроструктура излома волокнистая, как для образцов в исходном состоянии, так и поврежденных малоцикловою усталостью. Величина разрушающей нагрузки при вязком изломе образцов после малоциклового повреждения незначительно понизилась по отношению к этой же величине для неповрежденных образцов. Так, после наибольшего циклического повреждения повторным внецент-

Результаты испытания на внецентренное растяжение образцов из стали марки Ст.3 ($b_0 = 14 \text{ мм}$, $F_0 = 280 \text{ мм}^2$)

Состояние образцов		$t^{\circ}\text{C}$	P , кг	σ^x , кг/мм ²	b , мм	$\frac{b_0 - b}{b_0}$, %	$\frac{P_{(n=0)} - P_{(n=0)}}{P_{(n=0)}}$, %	Макроструктура излома		
Исходное		+ 20	10800	38,6	12,30	12,13		волокнист.		
		0	11400	40,7	12,53	10,5		—		
		- 20	11900	42,9	12,69	9,85		—		
		- 40	12300	44,0	13,36	4,57		шеvron		
		- 80	13800	49,3	13,30	5,00		—		
		-130	16400	58,6	13,35	4,54		—		
		-150	11300	—	14,0	0		кристаллич.		
		-180	9100	—	14,0	0		—		
		-196	8900	—	14,0	0		—		
		Поврежденные повторным растяжением $P_n = 6,0 \text{ т}$		100 циклов		+ 20	10600	37,9	12,25	12,5
0	11100					39,7	12,45	11,08	- 2,78	—
- 15	11500					41,1	12,53	10,5	- 6,49	—
- 35	11900					43,2	13,31	4,9	-10,2	шеvron
- 60	12500					44,6	13,30	5,0	-15,75	—
-100	14300					51,1	13,32	4,86	-32,4	—
-125	15700					56,1	13,30	5,0	-45,4	—
-145	10900					—	13,95	0,357	- 0,93	кристаллич.
-170	8400					—	13,96	0,286	+22,2	—
-196	7700					—	13,95	0,357	+28,7	—
200 циклов				+ 20	10300	36,8	12,21	12,78	+ 4,63	волокнист.
				- 5	10900	38,0	12,47	10,92	- 0,92	—
				- 25	11400	40,6	13,26	5,28	- 5,55	шеvron
				- 60	12300	44,0	13,25	5,36	-13,9	—
				-115	14500	51,7	13,26	5,28	-34,25	—
				-135	9900	—	13,91	0,7	+ 8,34	кристаллич.
				-160	7300	—	13,90	0,71	+32,4	—
				-196	5900	—	13,91	0,7	45,4	—
400 циклов				+ 20	10000	35,7	12,2	12,85	+ 7,42	волокнист.
				+ 5	10300	36,9	12,32	12,0	+ 4,63	—
				- 15	10800	38,6	13,21	5,6	0	шеvron
				- 60	11900	42,5	13,20	5,7	-10,2	—
				-105	13400	47,9	13,21	5,6	-24,1	—
				-125	9100	—	13,86	1,0	-15,75	кристаллич.
				-160	5300	—	13,85	1,07	+51,0	—
				-196	3900	—	13,86	1,0	+63,9	—
600 циклов				+ 20	9600	34,3	13,16	6,0	+11,1	шеvron
				- 20	10400	37,15	13,15	6,06	+ 3,7	—
				- 60	11200	40,0	13,15	6,06	- 3,7	—
				- 90	12000	42,9	13,16	6,0	-11,1	—
				-110	8100	—	13,8	1,4	+25,0	кристаллич.
				-150	3300	—	13,85	1,07	+69,5	—
				-196	1200	—	13,8	1,4	+88,95	—

х) Условные напряжения рассчитаны по методу Быкова В.А.

Таблица 4

Результаты испытаний на внецентренное растяжение образцов из стали марки 09Г2 ($b_0 = 20$ мм, $F_0 = 408$ мм²)

Состоя- ние об- разцов	$t^{\circ}\text{C}$	P , кг	σ^x , кг/мм ²	b , мм	$\frac{b_0-b}{b_0}$, %	$\frac{P_{(n=\infty)}-P_{(n>0)}}{P_{(n=0)}}$, %	Макрострук- тура излома	
Исходное	+ 20	18500	45,34	16,12	19,4		волокнист.	
	- 20	20200	49,51	16,88	15,6		—"	
	- 60	21500	52,45	18,80	6,0		шеvron	
	-140	24800	60,78	18,85	5,75		—"	
	-160	12700	-	20,00	0,0		кристаллич.	
	-196	11600	-	20,00	0,0		—"	
Поврежденные повторным растяжением	40% от общей долговечности	+ 20	18300	44,8	16,08	19,6	+ 1,08	волокнист.
		- 10	19400	47,5	16,64	16,8	- 4,86	—"
		- 50	20700	50,7	18,76	6,2	-11,9	шеvron
		-130	24000	58,8	18,75	6,25	-29,7	—"
		-150	12500	-	19,96	0,2	+32,4	кристаллич.
		-196	10900	-	19,95	0,25	+41,1	—"
	60% от общей долговечности	+ 20	18000	46,54	16,04	19,8	+ 2,7	волокнист.
		0	18700	45,8	15,42	17,9	- 1,08	—"
		- 40	20200	49,5	18,72	6,4	- 9,19	шеvron
		-120	23300	57,1	18,70	6,5	-26,0	—"
		-140	12400	-	19,90	0,5	+33,0	кристаллич.
		-196	9900	-	19,92	0,4	+46,5	—"
Поврежденные одним циклом сжатия	+ 20	17600	43,7	16,10	19,5	+ 4,86	волокнист.	
	+ 10	18100	44,36	16,48	17,7	+ 2,16	—"	
	- 30	19200	47,06	18,78	6,1	- 3,78	шеvron	
	-110	21300	52,2	18,80	6,0	-15,15	—"	
	-130	10800	-	19,98	0,1	+41,6	кристаллич.	
	-196	8200	-	19,96	0,2	+55,6	—"	

х) Условные напряжения рассчитаны по методу Быкова В.А.

Таблица 5

Результаты испытаний на внецентренное растяжение образцов из стали СХЛ-4 ($b_0 = 13,5$ мм; $F_0 = 275,4$ мм²)

Состояние образцов	$t^{\circ}\text{C}$	P , кг	σ^x , кг/мм ²	b , мм	$\frac{b_0 - b}{b_0}$, %	$\frac{P_{(n=q)} - P_{(n>q)}}{P_{(n=0)}}$, %	Макроструктура излома	
Исходное	+ 20	14500	52,65	11,3	16,3		волокнист.	
	- 20	16800	61,00	11,7	13,3		-"-	
	- 60	18700	66,00	12,80	5,19		шеvron	
	-140	22900	83,15	12,75	5,6		-"-	
	-160	11100	-	13,5	0,0		кристаллич.	
	-196	10200	-	13,5	0,0		-"-	
Поврежденные повторным растяжением	40% от общей долговечности	+ 20	14300	51,9	11,28	16,5	+ 1,38	волокнист.
		- 10	15900	57,7	11,53	14,6	- 9,65	-"-
		- 50	17800	64,6	12,75	5,6	-22,7	шеvron
		-130	22000	79,9	12,73	5,7	-51,7	-"-
		-150	10900	-	13,48	0,148	-24,8	кристаллич.
		-196	9400	-	13,49	0,074	+35,2	-"-
	60% от общей долговечности	+ 20	14100	51,2	11,23	16,8	+ 2,76	волокнист.
		0	15300	55,5	11,39	15,6	- 5,5	-"-
		- 40	16900	61,4	12,72	5,8	-16,55	шеvron
		-120	21300	77,3	12,70	5,93	-46,9	-"-
		-140	10700	-	13,48	0,148	+26,2	кристаллич.
		-196	8400	-	13,47	0,22	+42,1	-"-
Поврежденные одним циклом сжатия	+ 20	13200	47,9	11,29	16,4	+ 8,96	волокнист.	
	+ 10	14100	51,2	11,48	15,0	+ 2,76	-"-	
	- 30	15600	56,6	12,73	5,7	- 7,58	шеvron	
	-110	19100	69,3	12,72	5,8	-31,7	-"-	
	-130	9500	-	13,49	0,074	+34,5	кристаллич.	
	-196	5500	-	13,48	0,148	+62,1	-"-	

х) Условные напряжения рассчитаны по методу Быкова В.А.

ренным отнулевым растяжением или однократным сжатием, разрушающая нагрузка понизилась приблизительно на 10% по сравнению с разрушающей нагрузкой исходного состояния.

б) В случае полухрупкого состояния стали левая ветвь диаграммы $P - \Delta l$ представляется прямой восходящей линией с переходом к кривой при пластической деформации; правая часть диаграммы обрывается. Для распространения трещины до полного излома требуется меньшее количество энергии, чем при вязком разрушении. Полухрупкое состояние стали характеризуется высоким сопротивлением деформированию, но несколько меньшей утяжкой у надреза $\frac{\Delta b}{b_0}$, чем в первом случае.

Неповрежденные образцы полухрупко разрушались путем образования первичного надрыва у дна надреза и мгновенного распространения излома по неровной поверхности с разделением образцов на две части.

У образцов, накопивших малоцикловое повреждение, излом распространялся по кривой поверхности, причем иногда образцы разделялись на три части.

Причина излома образцов по кривой поверхности выявлена при исследовании напряжений методом фотоупругости в прозрачной модели плоского образца. Метод показал, что направление одной из линий изохромы (каждая точка которой имеет одну и ту же величину максимальных касательных напряжений) совпадает с направлением кривой поверхности излома стального образца. По очертанию этой кривой поверхности при циклическом нагружении произошло значительное микроповреждение и разрыхление материала, повлиявшее при полухрупком разрушении на направление излома стального образца. Поэтому макроструктура полухрупкого излома поврежденных и неповрежденных образцов имеет вид шеврона ("елочки") с чередующимися гребнями.

Поверхность излома типа "шеvron" обнаруживается при разрушении в эксплуатационных условиях конструкций цистерн, резервуаров, емкостей, корпусов судов при сочетании большой нагрузки и стесненных условий пластической деформации, в условиях низкой температуры, или перепада температур, остаточных напряжений, надреза и ряда других факторов. Следовательно, выбранный тип образца и разработанная методика испытания близко имитируют разрушение в эксплуатационных условиях конструкций из листовой стали. Величина разрушающей нагрузки при по-

лухрупком изломе образцов, поврежденных ранее циклическим внецентренным растяжением и однократным сжатием несколько уменьшилась по отношению к этим же величинам для образцов в исходном состоянии. Однако снижение разрушающей нагрузки после циклического растяжения или однократного сжатия не превышало 25% по сравнению с разрушающей нагрузкой неповрежденных образцов.

в) Для хрупкого состояния стали диаграмма внецентренного растяжения представляется прямой линией, которая обрывается при наибольшей нагрузке. Распространение трещины хрупкого излома происходит без подвода энергии извне. Хрупкое состояние стали характеризуется низким сопротивлением разрушению, отсутствием пластической деформации, в связи с чем $\frac{\Delta b}{b_0} = 0$.

Излом происходит мгновенно с разделением образца на две части по ровной поверхности с мелкокристаллической макроструктурой. Скорость распространения хрупкого излома приближается к скорости распространения звука в металле. Наиболее отчетливо выявилось охрупчивание образцов из стали после циклического воздействия (повторного внецентренного растяжения и однократного сжатия) по уменьшению хрупкой прочности по сравнению с хрупкой прочностью неповрежденных образцов. Так, при температуре испытаний -196°C для образцов из стали марки Ст.3 после наибольшего малоциклового повреждения внецентренным растяжением хрупкая прочность уменьшилась на 86%. У образцов из низколегированных сталей марок 09Г2 и СХЛ-4 обнаружено меньшее снижение хрупкой прочности: на 15-20% после повреждения повторным внецентренным растяжением и на 30% после повреждения однократным сжатием.

Для циклически поврежденных образцов выявилось повышение критической температуры хрупкости по сравнению с критической температурой хрупкости для неповрежденных образцов. Для образцов из стали марки Ст.3 критическая температура повысилась вследствие повреждения после 100 циклов на 5°C , после 200 циклов на 15°C , после 400 циклов на 25°C , после 600 циклов на $40-50^\circ\text{C}$. Для образцов низколегированных сталей марок 09Г2 и СХЛ-4 наблюдалось менее заметное повышение критической температуры хрупкости после повреждения от циклического воздействия. Так, после пробега, составляющего 40% от общей долговечности, критическая температура повысилась на 10°C ,

после пробега, составляющего 60% от общей долговечности на 20°C и несколько сильнее, на 30°C, в результате предварительного однократного сжатия (табл.4,5).

Изменение отношения между разрушающими нагрузками поврежденных и неповрежденных образцов при трех состояниях исследуемых сталей приведено на рис.2.

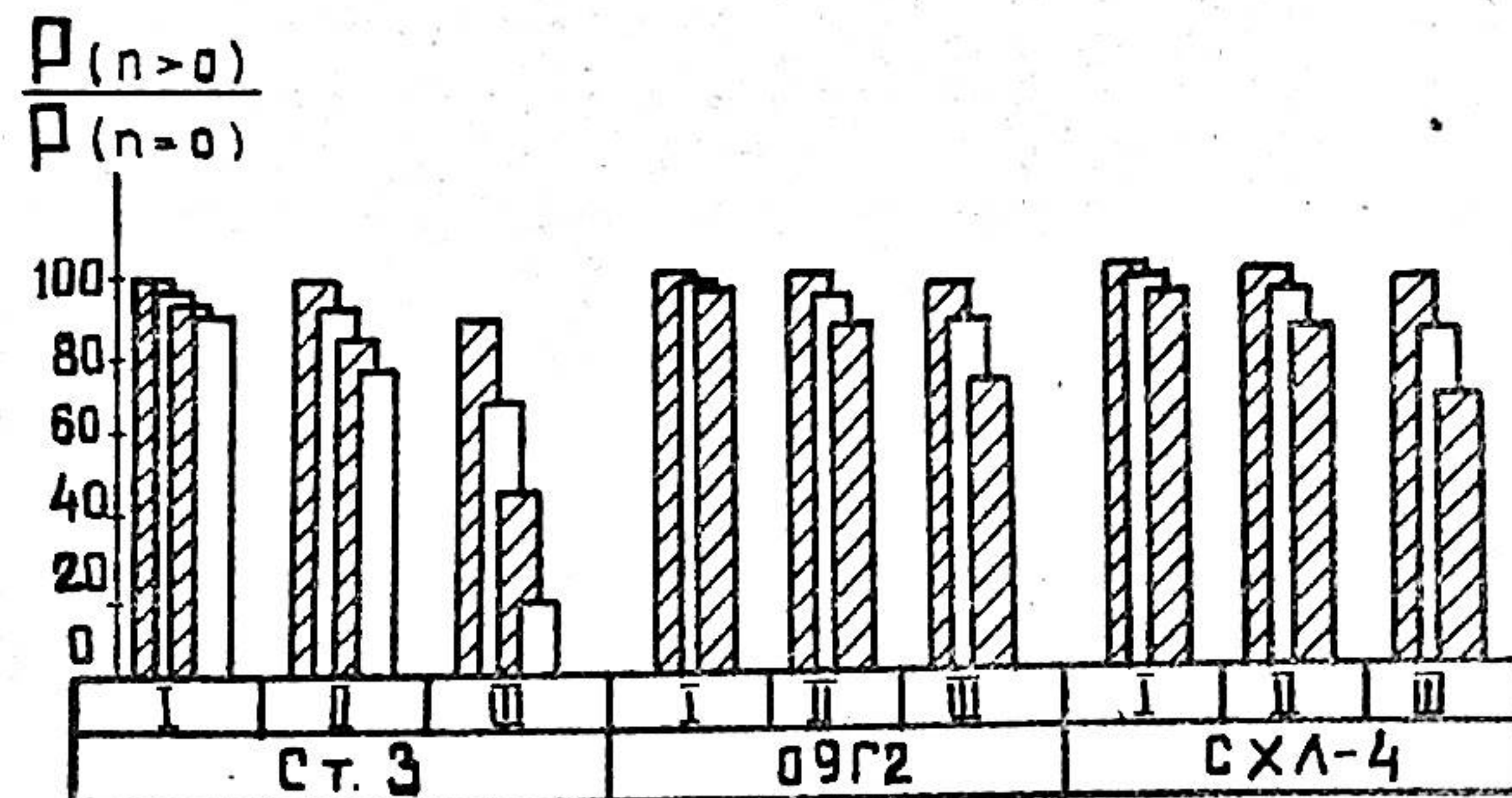


Рис.2. Наибольшие нагрузки статического внецентренного растяжения поврежденных образцов $P(n>0)$ в процентах от нагрузок неповрежденных образцов $P(n=0)$ при состояниях стали: I – вязком, II – полухрупком, III – хрупком. Повреждающие пробеги: Ст.3, первый столбик $n_1 = 100$, второй столбик $n_2 = 200$, третий столбик $n_3 = 400$, четвертый столбик $n_4 = 600$; сталь 09Г2, первый столбик $n_1 = 250$, второй столбик $n_2 = 400$, третий столбик $n_3 = 1$, сжатие; сталь СХЛ-4, первый столбик $n_1 = 400$, второй столбик $n_2 = 600$, третий столбик $n_3 = 1$, сжатие.

Для сравнения изменения вязкой, полухрупкой и хрупкой прочности исследуемых низколегированной и углеродистой стали был принят показатель степени охрупчивания

$$\alpha = \frac{P(n=0) - P(n>0)}{P(n=0)} \cdot 100, \%$$

где $P(n=0)$ – разрушающая нагрузка образцов из стали в исходном состоянии;

$P(n>0)$ – разрушающая нагрузка образцов, поврежденных при пробе $n < N$ циклов.

Показатель степени охрупчивания α предлагается учитывать при расчете конструкций, работающих в условиях низких температур, как дополнительный коэффициент запаса.

Угрозу хрупкого разрушения предвещает значительный по абсолютной величине показатель степени охрупчивания, хрупкое разрушение наступает при положительном значении α и тем возможно, чем количественно больше его величина.

У. Анализ и обобщение результатов исследования

В условиях отнулевого малоциклового внецентренного растяжения плоских образцов, согласно изменению твердости с возрастанием числа циклов исследуемые стали марок Ст.3, 09Г2, СХЛ-4 оказались циклически упрочняющимися. Наиболее интенсивное упрочнение наблюдалось после первого цикла. Со снижением напряженности и увеличением числа циклов образцы обнаружили три типа разрушения в зависимости от развития пластической деформации, предшествующей разрушению: I – квазистатическое при напряжениях, близких к статически разрушающим, $N = 4 \div 10$ циклов, когда пластическая деформация оказалась наибольшей и выше, чем при однократном нагружении; 2 – переходное разрушение при $N = 11 \div 900$ циклов; 3 – усталостное разрушение при номинальных напряжениях несколько превышающих предел текучести, когда пластическая деформация была значительно меньше, чем при первом и втором типах разрушения, а $N = 901 \div 7000$. Кривые малоциклового усталости для образцов из сталей марок Ст.3 и 09Г2 оказались примерно параллельными, а для сталей СХЛ-4 и 09Г2 пересекающимися, для последних сталей информация о прочности один раз меняется на противоположную с изменением циклической долговечности.

Например, по рис.1 для конструкций с эксплуатационной долговечностью $N \leq 10^4$ циклов, предпочтительнее сталь СХЛ-4, а с эксплуатационной долговечностью $N > 10^4$ циклов предпочтительнее сталь 09Г2.

Испытания поврежденных образцов на внецентренное растяжение с применением охлаждения свидетельствует об отрицательном влиянии малоциклового повреждения на сопротивление пластической деформации и разрушению, что служит признаком непрочности, хотя по ранее рассмотренным данным которого разупрочнения, хотя по ранее рассмотренным данным другой признак – повышение твердости – свидетельствовал, об

упрочнении материала. Особенно заметное отрицательное влияние малоциклового повреждения обнаруживается на сопротивлении хрупкому разрушению, которое снижается даже при циклических пробегах значительно меньших разрушающего. Это повреждение настолько устойчиво, что не снимается отжигом при нагреве до 1100°C даже в случае отсутствия на образцах трещин малоциклового усталости. Следовательно, малоцикловое повреждение обусловлено не столько возбуждением неблагоприятных остаточных напряжений, сколько неисправимыми микротрещинами усталости и разрыхлением стали вблизи надреза после малоциклового растяжения образца, или неблагоприятной ориентировкой структурных составляющих после однократного пластического сжатия. Таким образом, пластическая деформация циклического характера вызывает двойной эффект в связи с тем, что кривая сопротивления деформированию от циклического воздействия повышается, но и укорачивается из-за снижения предельной пластичности. Поэтому, по данным о твердости, циклически поврежденная сталь упрочняется, а по данным внецентренного разрыва — разупрочняется. Наиболее отчетливое разупрочнение обнаруживается по снижению значения сопротивления хрупкому разрушению, которое оказалось особенно заметным на стали Ст.5.

Рассмотренное выше вязкое, полухрупкое и хрупкое предельные состояния стали при осевом растяжении небольших гладких образцов воспроизвести значительно труднее, чем на крупногабаритных надрезанных образцах при внецентренном растяжении.

Наши испытания на растяжение гагаринских образцов из удовлетворяющей стандартным требованиям стали марки Ст.5, с охлаждением до температур глубокого холода, выявили только вязкое и полухрупкое состояния; из-за небольшой жесткости напряженного состояния в этом случае хрупкое разрушение не было достигнуто. На перегретой крупнозернистой стали при растяжении гладких охлажденных образцов Шевандину удалось воспроизвести все три состояния стали.

Опираясь на данные эксперимента и руководствуясь концепцией Иоффе-Давиденкова, Шевандин и Разов существенно дополнили эту концепцию, впервые охватив промежуточное полухрупкое состояние стали, возникновения которого Н.Н.Давиденков не касался. В результате Шевандин и Разов разработали диаграмму прочности стали с тремя ветвями, соответствующими вязкому, полухрупкому и хрупкому состояниям, а также диаграм-

му критических температур.

В данной диссертации указанные три состояния воспроизведены на крупногабаритных образцах из судокорпусных сталей стандартного качества с сохранением натурной толщины. Признаки предельных состояний, вытекающие из изменения сопротивления разрушению, остаточной деформации, вида излома и критической температуры обнаружили качественную сходимость в нашем исследовании и в исследовании Шевандина-Разова, выполненному на перегретой стали.

Выявленные три предельные состояния, свойственные работе стали в составе многократно перенапряженной конструкции, позволяют дать оценку эффективности общепринятых расчетов прочности. В случае многократных перегрузок эффективен лишь расчет, предупреждающий повреждение, обусловленное пластической деформацией. Расчет, предупреждающий хрупкое разрушение на практике не проводится. Для создания методики такого расчета будут полезными данные, полученные в настоящем исследовании.

ВЫВОДЫ

1. Предлагается методика испытаний сталей на малоциловую усталость и определение вязкой, полухрупкой и хрупкой прочности сталей на плоских образцах с надрезом, при сохранении толщины проката.

2. Согласно экспериментам, выполненным по разработанной методике на сталях Ст.3, СХЛ-4, 09Г2, наибольшая усталостная прочность при долговечности $N \leq 10^4$ циклов обнаружена для стали СХЛ-4, а при долговечности $N > 10^4$ циклов для стали 09Г2. Наименьшая усталостная прочность в любом случае оказалась у стали Ст.3.

3. Под циклическим действием пластической деформации в стали происходит сложный процесс, вследствие чего повышение твердости свидетельствует об упрочнении, а снижение сопротивления разрушению, особенно в случае хрупкости, свидетельствует о разупрочнении.

4. Кроме обычно рассматриваемых двух состояний стали — вязкого и хрупкого — для судокорпусной стали стандартного качества выявлено промежуточное полухрупкое состояние и две критические температуры, разделяющие указанные три состояния;

установлено повышение возможности менее благоприятных состояний стали в связи с малоцикловым повреждением.

5. Малоцикловое усталостное повреждение от циклического растяжения и однократного сжатия не оказывает существенного влияния на сопротивление исследуемых сталей пластической деформации при вязком и полухрупком состоянии, но заметно снижает сопротивление хрупкому разрушению.

6. В исследованном случае низколегированная сталь, улучшенная термообработкой, менее чувствительна к усталостному повреждению, чем углеродистая сталь в состоянии после проката.

7. Предварительное однократное сжатие образцов снижает хрупкую прочность, чем циклическое растяжение из-за неблагоприятного влияния остаточных растягивающих напряжений и создаваемом при сжатии противоположном растяжению ориентировки микроповреждений и микроразрывлений.

8. В результате малоциклового повреждения выявлено снижение запаса пластичности и повышение критической температуры перехода из вязкого в полухрупкое и из полухрупкого в хрупкое состояние, наиболее значительное у углеродистой стали, по сравнению с низколегированными.

9. В перенапряженных узлах конструкций из стали в процессе малоциклового усталости могут неожиданно возникать значительные хрупкие трещины при условии неблагоприятствующем пластичности.

10. Определение вязкой, полухрупкой и хрупкой прочности целесообразно проводить не только на образцах из стали в исходном состоянии, но и на образцах из стали с предысторией любого вида деформирования, а также с повреждением от технологических операций.

II. Добавление к традиционным испытаниям сталей испытания крупногабаритных надрезанных образцов с накопленным малоцикловым повреждением существенно усиливает эффективность контроля способности сталей деформироваться пластически. Применение таких испытаний в исследовательской практике может служить средством недопущения низкокачественных сталей для корпусов судов, предупреждая аварии, увеличивая эксплуатационные сроки и обеспечивая значительный технико-экономический эффект.

12. Полученные экспериментальные данные относительно хрупкой прочности сталей имеют значение для разработки расчета, предупреждающего хрупкое разрушение с учетом малоциклового повреждения.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих опубликованных статьях и в тезисах докладов:

1. Быков В.А., Никишина М.Л. Охрупчивание стали при малоциклового усталости. Труды НТО Судпрома, вып. 108, Л., 1968.
2. Никишина М.Л. Зависимость макроструктуры излома стали от величины пластической деформации, предшествующей разрушению. Труды ЛКИ, вып. XII, Л., 1968.
3. Быков В.А., Никишина М.Л. Влияние малоциклового повреждения на пластичность и прочность низколегированных сталей. Труды НТО Судпрома, вып. 131, Л., 1969.
4. Быков В.А., Никишина М.Л. Хрупкость стали, ее связь с малоциклового усталостью, расчет, предупреждающий хрупкое разрушение. Сб. Термопрочность материалов и конструктивных элементов, вып. У, изд. "Наукова думка", Киев, 1969.
5. Быков В.А., Затицкий А.М., Никишина М.Л. Изменение характеристик прочности и пластичности стали под влиянием усталостного повреждения. Доклад на У совещании по усталости, ИМЕТ АН СССР, 1969.
6. Исследование влияния малоциклового усталости на вязкую и хрупкую прочность судокорпусных сталей. Технический отчет. ЛКИ, 1969.
7. Никишина М.Л. Зависимость структуры излома от предшествующей пластической деформации. Тезисы докладов научно-технической конференции ЛКИ, 1967.
8. Быков В.А., Никишина М.Л. Зависимость макроструктуры излома от величины пластической деформации, предшествующей разрушению. Материалы межвузовской конференции по физике и механике прочности и разрушения. Новокузнецк, 1967.
9. Никишина М.Л. Охрупчивание судокорпусных сталей под влиянием малоциклового повреждения. Тезисы докладов научно-технической конференции ЛКИ, 1970.
10. Быков В.А., Никишина М.Л. Влияние малоциклового усталости (МЦУ) на пластичность и прочность низколегированных

статей. Тезисы докладов Всесоюзного семинара - совещания "Повышение качества металла для увеличения надежности и долговечности деталей машин и сооружений", М., 1969.

11. NIBBERING J.J., BYKOV V.A., NIKISHINA M.L. and others.
Report of Committee 11 (Fatigue and Brittle Fracture):
4 th International Ship Structures Congress, Tokyo,
1970, pp.33, 34.

Основное содержание диссертации было доложено:

1. На научно-технических конференциях ЛКИ, май 1967, апрель 1970.
2. На межвузовской конференции по физике и механике прочности и разрушения. Новокузнецк, ноябрь 1967.
3. На совещании по методам испытания металлов при низких температурах в Институте электросварки им Е.И.Патона, Киев, декабрь 1967.
4. В Ленинградском доме ученых им. М.Горького на секции сопротивления материалов, февраль 1968, на секции пластичности и прочности материалов, май 1969.
5. На III Всесоюзной конференции, посвященной памяти академика Ю.А.Шиманского, июнь 1968.
6. На У Совещании по усталости металлов. ИМЕТ, М., февраль 1969.