

М 464641

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 669.14.29:620.186.4

КОЗЛОВ Владимир Никитович

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ
УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С
КОРОТКИМИ ТРЕЩИНАМИ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ НАЛИЧИИ
ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ

Специальность 05.16.01 – Металловедение
и термическая обработка металлов

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

Москва – 1937

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
А.Г.Васильева

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор М.А.ШТРЕМЕЛЬ,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник В.Ю.ДОГАДУШКИН.

Ведущая организация - НПО ВИСКОМ

Защита диссертации состоится "14" декабря 1987 г. на
заседании специализированного совета К 053.15.13 в Московском
высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться

Автореферат разослан "

Ученый секрет
специализированного
к.т.н., доц

Подп. к печ. 28.10.87

Тираж 100 экз. Ротопринт МВТ

M 464641

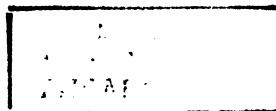
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. XXV съезд КПСС поставил важные задачи в области создания конструкционных материалов, улучшения их свойств и качества при реализации ресурсосберегающего направления в экономике. Необходимо существенно расширить номенклатуру, улучшить технико-экономические и прочностные характеристики конструкционных материалов, значительно снизить металлоемкость выпускаемой продукции.

Снижение металлоемкости конструкции приводит к повышению уровня рабочих нагрузок и возрастанию опасности преждевременного выхода ее из строя. В этих условиях для сохранения надежности машин и конструкций необходим правильный выбор материалов, что в свою очередь требует разработки обоснованных критериев конструкционной прочности. При этом следует учитывать, что изготовление машин и конструкций из материалов без дефектов типа трещин экономически нецелесообразно, поскольку несущая способность деталей на докритической стадии развития трещины сохраняется достаточной, а их долговечность с трещинами может составлять до 80 % от общей. В связи с тем, что на начальных стадиях развития все трещины являются короткими, актуальным является установление закономерностей разрушения металлов с короткими трещинами в зависимости от длины трещины, состава, структуры, комплекса механических свойств и схемы нагружения.

Ужесточение условий эксплуатации машин обязывает постоянно повышать достоверность методов прогнозирования поведения металла в течение всего ресурса, в том числе и на стадии развития трещины. Для этого в инженерной практике необходимо иметь физически ясные и простые в определении параметры трещиностойкости единообразные для всех видов разрушения и всех длин трещин. Такими характеристиками являются критические напряжения σ_c и коэффициент чувствительности металла к трещине W_c , которые используются в данной работе при анализе статической трещиностойкости углеродистых конструкционных сталей в широком диапазоне прочностных свойств.

Одним из наиболее важных свойств конструкционных материалов является способность тормозить развитие усталостной трещины. Использование различных технологических мероприятий для уменьшения скорости роста трещины служит существенным резервом увеличе-



ния долговечности деталей современных машин. В связи с этим большой практический интерес имеют условия полного прекращения роста трещины и возможность длительной безаварийной работы детали при наличии в ней так называемой нераспространяющейся усталостной трещины. К настоящему времени особенности развития нераспространяющихся малых усталостных трещин изучены чрезвычайно слабо. Первоочередными задачами здесь являются выяснение механизма торможения нераспространяющихся трещин в материалах различного состава и структурного состояния, а также разработка расчетного определения максимальной длины таких трещин в конструкциях, выполненных из различных материалов. Необходимо для каждого класса сталей определить основные физико-механические и структурные факторы, формирующие ту или иную длину нераспространяющихся трещин. Знание максимальной длины нераспространяющейся усталостной трещины позволит существенно повысить достоверность прогнозирования работоспособности деталей машин и обосновать нормы предельных размеров безопасных трещиноподобных дефектов в металлах.

Цель работы. Установление закономерностей разрушения углеродистых конструкционных сталей при наличии в них коротких трещин; анализ статической прочности данных сталей при наличии коротких трещин в зависимости от химического состава и режима термической обработки; определение размеров нераспространяющихся усталостных трещин в зависимости от механических свойств, содержания углерода и структурных факторов; прогнозирование работоспособности деталей машин при наличии в них дефектов типа трещин.

Научная новизна. Установлены закономерности разрушения углеродистых конструкционных сталей с короткими трещинами в зависимости от длины трещины, структуры, комплекса механических свойств и схемы нагружения.

Для анализа статической трещиностойкости материалов в области коротких трещин введено понятие пороговой длины трещины ℓ_w - равной такой максимальной длине трещины, при которой коэффициент чувствительности металла к трещине $\psi_c = 0$. При этом показано, что остаточная прочность металлов при наличии коротких трещин, длиной меньше пороговой величины ℓ_w , зависит только от площади неповрежденного сечения, в то время как при $\ell > \ell_w$ остаточная прочность зависит также от ψ_c .

Впервые построена диаграмма пороговой чувствительности металла к трещине в координатах "пороговая длина трещины - предел текучести", отражающая взаимосвязь длин трещин, к которым металл не чувствителен, с пределом текучести для любого характера разрушения.

Установлено, что с увеличением содержания углерода в конструкционных углеродистых сталях температура отпуска, при которой достигается пороговая длина трещины, сдвигается в сторону более высоких температур нагрева.

Установлены условия существования нераспространяющихся усталостных трещин в углеродистых конструкционных сталях. Выявлен характер зависимости максимальной длины нераспространяющейся усталостной трещины от механических характеристик и структурных факторов материала. Доказана правомерность методов механики разрушения для расчета максимальной длины нераспространяющихся трещин.

Практическая ценность. Разработана методика оценки статической трещиностойкости металлов при наличии в них коротких трещин.

На основе анализа статической трещиностойкости углеродистых конструкционных сталей в области малых трещин разработана методика определения пороговой длины трещины l_w .

Установлены температуры отпуска, обеспечивающие максимальную длину пороговой трещины углеродистых конструкционных сталей.

Разработана методика экспериментального и расчетного определения максимальной длины нераспространяющихся усталостных трещин в сталях.

Полученные результаты использованы при реализации мероприятий, направленных на снижение металлоемкости комбайна "Нива". Экономический эффект составил 32,1 тыс. руб. в год.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены:

1. На Всесоюзной научной конференции "Современные проблемы технологии машиностроения", Москва, 1986 г.

2. На научно-техническом семинаре "Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов", Ленинград, 1986 г.

Публикации. Результаты диссертации изложены в двух публикациях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и трех приложений. Ее содержание изложено на 101 странице машинописного текста, содержит 47 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 101 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проблемы исследования и необходимости проведения данной работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан критический анализ механических и структурных аспектов трещиностойкости металлов в присутствии коротких трещин. Рассмотрены параметры, наиболее простые, с точки зрения определения, и удобные при оценке трещиностойкости металлов: критические напряжения σ_c (σ_{c0}), предел трещиностойкости I_c и коэффициент чувствительности материала к трещине ω_c , отмечены их достоинства и недостатки. Признано, что перспективной характеристикой трещиностойкости материала является коэффициент чувствительности к трещине ω_c .

К настоящему времени существует практика использования параметра ω_c применительно к анализу остаточной прочности металлов в области преимущественно длинных трещин. Однако основные достоинства коэффициента чувствительности ω_c как "инструмента" в исследовании трещиностойкости материалов лежат в области коротких трещин: здесь несомненный практический интерес имеет определение тех длин трещин, к которым материал не чувствителен с точки зрения его прочности при статическом нагружении. Данное требование реализуется при условии $\omega_c \leq 0$. Можно полагать, что максимальное значение длины трещины, при котором $\omega_c = 0$ укажет именно предельный размер трещиноподобных дефектов, влияние которых на остаточную прочность металлов можно заранее определить расчетным путем.

Сделан вывод о необходимости разработки методики оценки статической трещиностойкости металлов при наличии в них коротких трещин.

Проведен анализ современных представлений о пороговой усталости сталей, а также о влиянии структурных и металлургических факторов на процесс зарождения и роста малых усталостных трещин. Отмечено, что не получила еще окончательного решения проблема коротких трещин, которые становятся нераспространяющи-

мися. Поскольку важнейшим показателем способности материала содержать нераспространяющиеся трещины является пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , возникла потребность разработки расчетного определения K_{th} с учетом влияния структуры и механических свойств сталей на закономерности развития нераспространяющихся усталостных трещин. Показана возможность определения предельных условий, не приводящих к росту трещин от трещиноподобных дефектов, или условий остановки развития уже зародившихся малых усталостных трещин. Указывается, что отсутствие обоснованных норм в отношении предельно допустимых размеров малых усталостных трещин часто приводит к преждевременной замене деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения. В этой связи в настоящей работе разработана методика расчетного и экспериментального определения максимальной длины нераспространяющихся трещин в зависимости от механических свойств и структурных состояний.

Приведены литературные данные о взаимосвязи свойств конструкционных материалов и размеров нераспространяющихся трещин; подчеркивается, что получение аналогичных экспериментальных данных для углеродистых конструкционных сталей, широко применяемых в народном хозяйстве позволит ускорить практическое применение таких результатов.

Во второй главе сформулирована цель и задачи исследования, обоснован выбор материалов и описаны методы исследования.

Выбор материала обусловлен целью и задачами работы. Исследования проводили на сталях 09Г2С, Ст3, 30, 35, 45, 65, 40Х, находящихся в настоящее время широкое применение в сельскохозяйственном и транспортном машиностроении, а также на малоуглеродистых микролегированных сталях и на малоуглеродистых легированных сталях, возможности применения которых в указанных отраслях в настоящее время изучаются. Все стали были промышленной выплавки и поставлены в виде листового и пруткового горячекатаного проката в соответствии с действующими ГОСТами и ТУ.

Влияние термической обработки на статическую трещиностойкость металлов изучали на сталях 09Г2С, 30, 45, 65 и на малоуглеродистых легированных сталях. Применяли наиболее распространенную для данных сталей технологию термической обработки, состоящую из закалки и последующего отпуска, температуру которого варьировали в пределах 200...690°C; проводили также нормализа-

пию и отжиг. В результате был получен широкий спектр прочностных свойств и структурных состояний.

Пределы прочности и текучести, относительное удлинение и сужение исследованных материалов определяли при одноосном растяжении плоских поперечных и цилиндрических круглых образцов.

Определение статической трещиностойкости сталей проводили на плоских образцах размерами $220 \times 50 \times t$ и $400 \times 10 \times t$ мм (толщину образцов t варьировали от 3 до 6 мм). Образцы испытывали на одноосное растяжение и трехточечный изгиб как при наличии трещины, так и без трещины (т.е. гладкие образцы). Предел прочности на изгиб определяли экстраполяцией зависимости $\sigma_c = f(l)$ на нулевую длину трещины.

Заготовки вырезали из листа так, чтобы направления прокатки и наносимой трещины совпадали и были перпендикулярны линии действия разрушающей силы P_{max} . На заготовки размерами $220 \times 54 \times t$ и $400 \times 104 \times t$ мм наносили фрезой надрез глубиной 3 мм, затем выращивали на гидропульсаторе ГРМ-I усталостные трещины различной длины с последующим шлифованием торцевой поверхности до ширины образца b , равной 50 и 100 мм соответственно. В итоге получили набор образцов с длиной усталостных трещин от 0,1 до 7 мм.

Упрочняющую термическую обработку проводили после нанесения усталостной трещины. С целью исключения влияния на характеристики трещиностойкости возникающей при термической обработке крупнозернистости у вершины трещины, ранее нанесенную усталостную трещину дораставляли на величину 0,3...1,0 мм. Испытания на одноосное растяжение и сосредоточенный изгиб проводили на универсальной машине ГРМ-I. Скорость перемещения захватов составляла 4 мм/мин. Исходными данными являлись зависимости разрушающей максимальной нагрузки P_{max} от длины трещины l . По формулам сопротивления материалов определяли номинальные разрушающие напряжения (критические) в брутто-сечении - σ_c . Затем находили коэффициент чувствительности металла к трещине $\omega_c = (\sigma_c^T - \sigma_c) / \sigma_B$, где σ_c^T - остаточная прочность металла нечувствительного к трещине $\sigma_c^T = \sigma_B (1 - l/b)$; σ_B - предел прочности материала для данного вида нагружения. Длину трещины, имеющейся в образце до испытания, измеряли после его разрушения на инструментальном микроскопе с погрешностью не более 0,05 мм. Поскольку фронт распространения усталостной трещины по толщине образца имеет кри-

визу, определение длины трещины сводили к расчету среднего арифметического от 8-10 замеров.

Для исследования кинетики роста малых усталостных трещин в углеродистых конструкционных сталях использовали цилиндрические образцы диаметром 16 мм с кольцевыми надрезами. Образцы испытывали на консольный изгиб с вращением при частоте 50 Гц на машине УКИ-6000-2. Для определения длин трещин, зародившихся в вершинах надрезов, образцы после разрушения ($N < 10^7$ циклов) или после прохождения базы испытаний ($10^7 \dots 10^8$ циклов, т.е. нераспространяющиеся трещины) разрезали в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, содержащих продольную ось образца. Приготовленные после разрезки металлографические шлифы подвергали химическому либо электролитическому травлению с целью выявления структуры и микротрещины. На металлографическом микроскопе "НЕОР-НОТ 21" с помощью координатной линейки на окуляре измеряли длину трещины в 4-х участках одного надреза при увеличении 200...1000. С целью обеспечения широкого диапазона числа циклов нагружения варьировали прикладываемую нагрузку так, чтобы в каком-либо надрезе сохранялось требуемое постоянное амплитудное напряжение σ_a . Скорость роста усталостной трещины оценивали путем графического дифференцирования зависимости " $\ell - N$ ".

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с оценкой трещиностойкости сталей при статическом нагружении в области коротких трещин.

Развиты представления о чувствительности металлов к трещине. Теоретически показано, что коэффициент чувствительности ω_c должен быть больше нуля, и материалов абсолютно не чувствительных к трещине не существует, точно так же как нет и абсолютно хрупких тел. Однако в области коротких трещин для большинства металлов, вследствие объемности напряженного состояния в вершине, может наблюдаться превышение разрушающей нагрузки надрезанного образца по сравнению с гладким образцом. В силу этого для различных материалов в зависимости от их структурного состояния и способа нагружения будут реализовываться условия существования отрицательных значений ω_c . Так для стали 09Г2С в широком спектре прочностных свойств отчетливо наблюдалось существование отрицательных значений коэффициента чувствительности ω_c .

Показано, что для разработки материалов, обладающих высокой трещиностойкостью (малым ω_c), необходимо повысить модуль

Диаг E и характеристики пластичности, требуемые для обеспечения достаточно большого предельного радиуса в вершине трещины τ_c . Кроме того необходима высокая исходная прочность материала (σ_B). Имеющие высокую пластичность сплавы, будут обладать низким предельным значением секущего модуля E_{sc} . Целенаправленное и одновременное воздействие на параметры E , E_{sc} , σ_B , τ_c позволит, таким образом, получать материалы высокой трещиностойкостью, что обеспечит их надежную эксплуатацию в конструкциях различного назначения.

Разработана методика оценки статической трещиностойкости металлов в присутствии коротких трещин.

Введен параметр пороговой длины ℓ_w - равной такой максимальной длине трещины, при которой коэффициент чувствительности металла к трещине $\omega_c = 0$. Показано, что при разрушении стали с трещиной длиной $\ell/\delta \leq \ell_w$ уменьшение остаточной прочности за счет чувствительности материала к трещине компенсируется соответствующим увеличением σ_c за счет эффекта объемности напряженного состояния вблизи трещины. При длине трещины $\ell/\delta > \ell_w$ влияние фактора объемности уже не создает условий, при которых $\omega_c \leq 0$ в силу высокой чувствительности стали к длинным трещинам. Поэтому значения остаточной прочности в области $\ell/\delta \leq \ell_w$ будут $\sigma_c \geq \sigma_B(1-\ell/\delta)$, в области $\ell/\delta > \ell_w$ $\sigma_c = \sigma_B(1-\ell/\delta) - \omega_c \sigma_B$. Наличие трещиноподобных дефектов размером не более ℓ_w не снизит начальную прочность σ_B ниже заранее известного значения $\sigma_B(1-\ell/\delta)$, где δ - геометрический размер элемента конструкции, вдоль которого распространяется трещина. Следовательно, для материалов, обладающих значительной дефектностью структуры и склонных в условиях эксплуатации к третинообразованию, целесообразно определять порог чувствительности ℓ_w и стремиться путем упрочняющей обработки достигать высоких значений ℓ_w при требуемом уровне других механических свойств.

На основе анализа статической трещиностойкости малоуглеродистых сталей (0,14; 0,21 % C), микролегированных Al, Ti, Ca, установлено, что знание только стандартных механических свойств явно недостаточно для оценки работоспособности металла в условиях эксплуатации, т.е. при наличии в нем коротких трещин. Установлено, что несущая способность металла будет зависеть от размеров детали (δ), величины порога чувствительности (ℓ_w) и собственно чувствительности металла к трещине (ω_c). Это необ-

ходимо учитывать для рационального выбора материала при создании той или иной конструкции.

Результаты исследований малоуглеродистых легированных сталей (0,008; 0,25 % С) показали, что повышение содержания углерода способствует увеличению чувствительности стали к короткой трещине и, следовательно, уменьшению пороговой длины трещины ℓ_w .

Изучено влияние схемы нагружения на пороговую длину трещины ℓ_w . Так для стали 09Г2С величина ℓ_w при изгибе значительно меньше ($\ell/\delta = 0,015$), чем при растяжении ($\ell/\delta = 0,08$), что объясняется увеличенной при изгибе по сравнению с растяжением неравномерностью напряженного состояния по сечению. В связи с этим при конст. уировании изделий целесообразно избегать или максимально уменьшать появление изгибающих моментов в наиболее нагруженных зонах, где возможно зарождение трещины.

В широком интервале содержания углерода в стали выявлен характер зависимости пороговой длины трещины ℓ_w от температуры отпуска и прочностных свойств. Впервые построена зависимость пороговой длины трещины ℓ_w от предела текучести $\sigma_{0,2}$, которую назвали диаграммой пороговой чувствительности углеродистых конструкционных сталей к трещине (рис. 1). Из диаграммы, построенной по результатам испытаний на растяжение, следует, что наибольшие значения ℓ_w углеродистых сталей соответствуют диапазону $\sigma_{0,2} = 500 \dots 900$ МПа. Так для стали 09Г2С максимальная пороговая длина трещины ℓ_w формируется при отпуске $400 \dots 450^\circ\text{C}$, что соответствует $\sigma_{0,2} = 750 \dots 850$ МПа. При этих температурах отпуска в результате сохранения субструктуры мартенсита и некоторого уменьшения в нем плотности дислокаций создается оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств, обеспечивающих пониженную чувствительность стали с такой структурой к трещине. Из диаграммы видно, что экстремум зависимостей ℓ_w от $\sigma_{0,2}$ наблюдается для вязкоразрушающихся углеродистых сталей и не существует в случае хрупкого разрушения. Поэтому факторы, способствующие переходу к более энергоемкому вязкому микромеханизму разрушения, благоприятно воздействуют на трещиностойкость высокоуглеродистых и низкоотпущенных сталей.

Зависимость порога чувствительности к трещине ℓ_w углеродистых сталей от температуры отпуска тоже имеет экстремум. Особенно отчетливо эта закономерность проявляется у средне- и низкоуглеродистых сталей. Разрушение высокоуглеродистых сталей

($\neq 0,65\%$) при всех режимах термообработки, кроме высокого отпуска ($650 \dots 690^\circ\text{C}$), происходит в условиях плоской деформации.

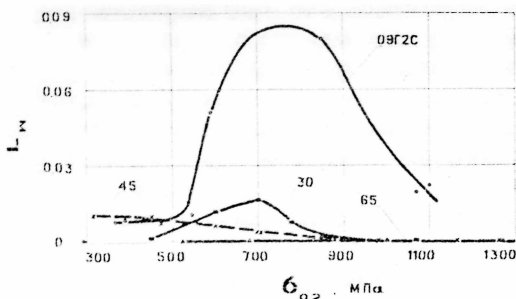


Рис. 1. Диаграмма пороговой чувствительности углеродистых конструкционных сталей к трещине

При переходе от низкоуглеродистых к средне- и высокоуглеродистым сталям максимальный уровень трещиностойкости I_c достигается при более высокой температуре отпуска. Закономерность, описывающая влияние содержания углерода на температуру отпуска, при которой реализуется наибольшая трещиностойкость, аналогична закономерности влияния содержания углерода на температуру отпуска стали, при которой обеспечивается максимальная длина пороговой трещины l_w : чем больше в стали углерода, тем выше должна быть температура отпуска для достижения наибольшего для данной стали порога чувствительности к трещине. С повышением содержания углерода выше $0,45\%$ сталь становится чувствительной к трещинам любой длины ($w_c > 0$), т.е. не имеет пороговой длины трещины.

Таким образом, для оценки влияния длины трещин на степень снижения статической прочности сталей в конкретных условиях нагружения целесообразно построение зависимостей w_c от l/b . Если сталь имеет порог чувствительности l_w , что характерно для малоуглеродистых сталей, то присутствие трещины длиной менее l_w не представляет опасности, поскольку в этом случае можно вычислить нижнее значение остаточной прочности:

$$\sigma_c = \sigma_B (1 - l/b)$$

В четвертой главе рассмотрена циклическая трещиностойкость металлов в присутствии коротких трещин. Исследованы особенности кинетики роста малых усталостных трещин в углеродистых конструк-

ционных сталях в зависимости от комплекса механических свойств и структурных факторов. Особое внимание уделено так называемым нераспространяющимся коротким трещинам. Данные трещины существуют при размахе напряжений меньше предела выносливости и отличаются тем, что стартуют с большой скоростью, затем их рост замедляется и они останавливаются, достигая при действии напряжений на уровне предела выносливости максимальной длины l_0 .

Исследованы 5 марок конструкционных углеродистых сталей: 09Г2, Ст3, 35, 45 и 40Х. Предел усталости σ_{-1K} определяли на цилиндрических образцах с кольцевыми надрезами на базе 10^8 циклов нагружения. Кривую усталости для каждого варианта структурного состояния строили по результатам испытаний 15...20 образцов. Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ рассчитывали по формулам Нейбера. Предел усталости для гладких образцов определяли как $\sigma_{-1} = \sigma_{-1K} K_\sigma$.

Разработана методика экспериментального и расчетного определения максимальной длины нераспространяющихся усталостных трещин в сталях. При экспериментальном определении максимальной длины нераспространяющейся трещины $l_0^{экс}$, образцы испытывали на базе 10^8 циклов. Для этого в наиболее нагруженном сечении создавали номинальные амплитудные напряжения σ_a равные или очень близкие пределу выносливости σ_{-1K} . После испытаний образцы разрезали по двум взаимно перпендикулярным плоскостям вдоль оси образца. Максимальную длину усталостной трещины (из 4-х значений, т.е. в 4-х участках одного кольцевого надреза), зародившейся в вершине надреза при известном номинальном напряжении в нем, принимали за размер нераспространяющейся трещины для данного материала. Среднее значение, полученное по результатам измерений на 2-3 образцах, принимали за экспериментально найденное значение максимальной длины нераспространяющейся трещины $l_0^{экс}$ материала.

Установлено, что даже незначительное отклонение (снижение в пределах 5...10 %) номинальных напряжений в надрезе от уровня σ_{-1K} весьма сильно - в несколько раз уменьшало длину обнаруживаемой нераспространяющейся трещины, а зачастую трещина не зарождалась вообще.

Показано, что с повышением механических свойств материала ($\sigma_{a,2}$, σ_{-1}) размер короткой нераспространяющейся трещины уменьшается.

Для углеродистых конструкционных сталей со структурой фер-

рит + перлит обнаружена прямопропорциональная зависимость между максимальной длиной нераспространяющейся трещины $\ell_0^{\text{экс}}$ и средним условным диаметром зерна $d_3^{\text{усл}}$. Чем больше $d_3^{\text{усл}}$, тем больше $\ell_0^{\text{экс}}$. При этом установлено, что для исследованных углеродистых сталей наблюдается устойчивое соотношение

$$\ell_0^{\text{экс}} \approx 10 d_3^{\text{усл}}$$

Изучено влияние содержания углерода в углеродистых сталях на максимальную длину нераспространяющейся трещины (ℓ_0). Показано, что малоуглеродистые стали имеют высокие значения ℓ_0 .

На рис. 2 для горячекатаной стали 35 приведена зависимость амплитудного напряжения σ_a и пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений $K_{\text{пор}}$ от длины трещины. Видно, что экспериментально определенная максимальная длина нераспространяющейся трещины ($\ell_0^{\text{экс}} = 0,17$ мм) при напряжении равном пределу выносливости (σ_{-1}) делит поля σ_a и $K_{\text{пор}}$ на две области. Поскольку в левой области при $\ell < \ell_0$ величина K_{th} зависит от длины короткой трещины, предложено в качестве критической характеристики материала использовать предел трещиностойкости, для которого в рассматриваемой области можно записать $I_c < K_{th}$. В этой области для продвижения усталостной трещины необходимо непрерывно повышать напряжение аналогично повышению разрушающего напряжения на диаграмме разрушения до момента наступления критического состояния. При $\ell = \ell_0$ имеем $\sigma_a = \sigma_{-1}$. Таким образом, при $\ell < \ell_0$ разрушение упругопластическое, и с этой точки зрения можно его рассматривать как вязкое. Когда $\ell > \ell_0$, разрушение подчиняется закономерностям линейной механики разрушения ($I_c \equiv K_{th}$), оно хрупкое, и характеристика $K_{th} = \text{const}$, т.е. естественным образом не зависит от длины трещины. При этом с ростом ℓ напряжение, при котором трещина не распространяется, понижается по сравнению с пределом выносливости σ_{-1} .

Для расчетного определения максимальной длины нераспространяющейся усталостной трещины $\ell_0^{\text{рас}}$ в сталях предлагается формула:

$$K_{th} = \sigma_{-1} \sqrt{\pi \ell_0^{\text{рас}}} Y, \quad (I)$$

здесь: Y - тарировочная функция принимается за 1; $\sigma_{-1} = \sigma_{-1K} K_\sigma$;

K_{th} - находят в литературных источниках в зависимости от стандартных механических свойств, либо определяют экспериментально. Для углеродистых сталей, имеющих структурное состояние, четко определяемое средним условным диаметром зерна $d_3^{\text{усл}}$, мож-

но определять длину максимальной нераспространяющейся трещины по формуле:

$$\rho_0^{pac} \approx 10 d_3^{ysl} \quad (2)$$

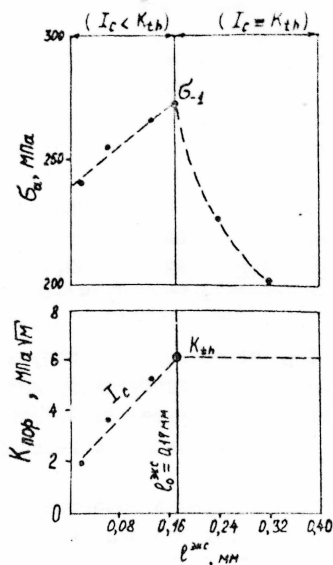


Рис. 2. Зависимость амплитудного напряжения σ_a и пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений $K_{пор}$ от длины трещины ρ^{exc} (сталь 35; $\sigma_{0,2} = 380$ МПа)

Показано, что экспериментально полученные значения максимальных длин нераспространяющихся трещин (ρ_0^{exc}) хорошо согласуются с их расчетными значениями (ρ_0^{pac}), вычисленными на основе линейной механики разрушения.

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности разрушения углеродистых конструкционных сталей с короткими трещинами в зависимости от длины трещины, структуры, комплекса механических свойств и схемы

нагружения.

2. Предложен параметр пороговой длины ℓ_w - равной такой максимальной длине трещины, при которой коэффициент чувствительности металла к трещине $\omega_c = 0$. Показано, что остаточная прочность металлов в присутствии коротких трещин при $\ell < \ell_w$ зависит только от площади неповрежденного сечения, а при $\ell > \ell_w$ - также от коэффициента ω_c .

3. Показано, что максимальное значение ℓ_w при переходе от малоуглеродистых к среднеуглеродистым сталям достигается при более высокой температуре отпуска, при этом реализуемые ℓ_w резко снижаются. Высокоуглеродистые стали не имеют пороговой длины трещины.

4. Существование и величина пороговой длины трещины зависят от вида нагружения. При изгибающих нагрузках наличие ℓ_w свойственно только малоуглеродистым сталям, при этом максимальная величина ℓ_w при изгибе значительно меньше, чем при растяжении.

5. Зависимость ℓ_w от температуры отпуска углеродистых сталей и от прочностных свойств имеет экстремальный характер. Установлено, что влияние данных факторов на формирование максимальных значений ℓ_w и максимальной трещиностойкости I_c аналогично.

6. Впервые построена диаграмма пороговой чувствительности металла к трещине в координатах "пороговая длина трещины (ℓ_w) - предел текучести ($\sigma_{0,2}$)". Данная диаграмма отражает взаимосвязь длин коротких трещин, к которым металл не чувствителен, с пределом текучести при любом характере разрушения.

7. Разработана методика оценки статической трещиностойкости металлов при наличии в них коротких трещин.

8. Разработана методика расчетного и экспериментального определения максимальной длины нераспространяющейся трещины (ℓ_0) в сталях.

9. Установлены условия существования нераспространяющихся усталостных трещин в углеродистых конструкционных сталях. Выявлен характер зависимости ℓ_0 от механических характеристик и структурных факторов материала. При этом показано, что для углеродистых сталей, имеющих структурное состояние с четко определяемым средним условным диаметром зерна $d_3^{усл}$, максимальную длину нераспространяющейся трещины можно определять по формуле:

$$\ell_0 \approx 10 d_3^{учл}$$

Ю. При длине трещины меньше максимальной длины нераспространяющейся трещины ($\ell < \ell_0$) условия распространения трещины описываются законами упругопластической механики разрушения ($I_c < K_{th}$). При $\ell > \ell_0$ рост трещины подчиняется законам линейной механики разрушения ($I_c \equiv K_{th}$).

II. Полученные результаты использованы при реализации мероприятий, направленных на снижение металлоемкости комбайна "Нива". Экономический эффект составил 32,1 тыс. руб. в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Васильева А.Г., Козлов В.Н. Зарождение усталостных трещин в болтовых соединениях сельхозмашин // Современные проблемы технологии машиностроения: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Москва, 1986. - С. 63-64.

2. Анохин А.А., Козлов В.Н., Васильева А.Г. Трещиностойкость малоуглеродистых низколегированных сталей в присутствии коротких трещин // Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - № 6. - С. III-III4.

В.Козлов