

М 420541  
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 669.15:539.43

АНОХИН Александр Андреевич

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО  
РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО  
УМЕНЬШЕНИЮ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ СЕЛЬХОЗМАШИН

(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 - 1984.

НА ДОМ  
ВЫДАЕТСЯ

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  
ВАСИЛЬЕВА А.Г.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,  
профессор ШТРЕМЕЛЬ М.А.  
- кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник НЕШПОР Г.С.

Ведущая организация - указано в решении специализированного  
совета

Защита  
на заседании  
высшего технического

Ваша  
печатью,

С диссертацией

Автор

1984 г.  
Московском  
:

рецензент

Г.С.

М420541

Г.С.

Подпись

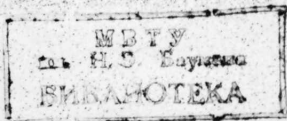
Г.С.

Тираж 100 экз., 1984 г., Москва, 2-я Бауманская, 5

Актуальность проблемы. Одним из путей преодоления дефицита металла, как отмечалось на XXVI съезде КПСС, помимо развития черной и цветной металлургии, является "более полное и умелое использование того, что производится". Немалые резервы здесь заложены в сокращении металлоемкости выпускаемой продукции. Весьма остро проблема экономии металла стоит в области сельскохозяйственного машиностроения, где многие машины обладают повышенной металлоемкостью. Однако снижение веса конструкции является весьма сложной задачей, поскольку уменьшение расхода металла в изделии ведет к увеличению уровня действующих напряжений, что усиливает опасность преждевременного разрушения конструкции. Поэтому необходимо дальнейшее углубление знаний о закономерностях разрушения металлических материалов и прежде всего о важнейшей стадии процесса разрушения — стадии развития трещины.

Изучение закономерностей разрушения необходимо и для решения главной прикладной задачи металлоуплотнения — создания новых материалов с наперек заданными механическими свойствами в сочетании с предельно высоким уровнем сопротивления развитию трещины, то есть трещиностойкости. Здесь остается открытым широкий круг вопросов, связанных с установлением количественных закономерностей влияния легирования, термической обработки, напряженно-деформированного состояния и т.д. на сопротивление металлов распространению трещин при статических, динамических и циклических нагрузках. К настоящему времени достигнуты значительные успехи в решении этих вопросов применительно к хрупкому разрушению стальных конструкций. Закономерности такого вида разрушения металлов основываются на концепции коэффициента интенсивности напряжений и изучены достаточно подробно, а правомерность и объективность этой концепции подтверждена многолетней мировой практикой.

Однако применяемые в сельхозмашиностроении углеродистые и низколегированные стали являются низкопрочными и обладают высокими пластическими свойствами. Разрушение таких сталей в тонких сечениях является вязким, то есть сопровождается большими пластическими деформациями. Ввиду того, что при упруго-пластическом разрушении проявляются нелинейные эффекты развития трещины, его изучение сопряжено со значительными теоретическими и мето-



дическими трудностями. Вместе с тем решение ряда важных практических задач, связанных с повышением работоспособности материала в конструкции, требует дальнейших научных разработок.

Цель работы. Основной целью работы является установление закономерностей упруго-пластического разрушения углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; определение статической трещиностойкости данных сталей в зависимости от режима термической обработки и химического состава; снижение металлоемкости несущей системы культиватора УСМК-5,4Б за счет более полного использования резервов конструктивной прочности материала.

Научная новизна. Установлены закономерности разрушения углеродистых и низколегированных конструкционных сталей при развитой упруго-пластической деформации. Показано, что их трещиностойкость в этих условиях является важной характеристикой конструктивной прочности.

Предложено для расчетов на прочность элементов конструкций с трещинами ввести представление о конструкционной трещиностойкости  $\Lambda_c$ , являющейся инвариантной мерой трещиностойкости для образца и элемента конструкции.

Впервые построена обобщенная диаграмма конструктивной прочности в координатах "предел трещиностойкости - предел текучести", которая отражает связь трещиностойкости с пределом текучести при любой степени стесненности пластических деформаций.

Установлено, что в области упруго-пластических разрушений, в отличие от области хрупких разрушений, зависимость трещиностойкости от предела текучести углеродистых и низколегированных сталей имеет экстремальный характер.

Установлено, что с увеличением содержания углерода в данных сталях температура отпуска, при которой достигается максимальная трещиностойкость, сдвинута в сторону более высоких температур нагрева.

Практическая ценность. Разработана методика определения статической трещиностойкости пластичных сталей, в которой учтены рациональный выбор геометрии образца и способа его нагружения при широком варьировании длины трещины.

Установлены температуры отпуска, обеспечивающие максимальную трещиностойкость углеродистых и низколегированных сталей.

На основе установленных закономерностей разрушения сталей

и результатов испытаний гнутых замкнутых профилей даны практические рекомендации по снижению металлоемкости культиватора УСМК-5,4Г за счет уменьшения коэффициента запаса прочности несущего бруса из стали 09Г2. Экономический эффект составил 81,1 тыс. руб.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены:

1. На научно-техническом семинаре "Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов", Ленинград, 1983 г.

2. На Всесоюзной научно-технической конференции "Производство и применение экономных профилей проката для тракторного и сельскохозяйственного машиностроения", Днепропетровск, 1983 г.

3. На научно-технической конференции "Перспективы повышения сопротивления материалов и конструкций вязкому разрушению", Москва, 1983 г.

Публикации. Результаты диссертации изложены в четырех публикациях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов. Ее содержание изложено на 125 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 8 таблиц и библиографию, включающую 110 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен критический анализ существующих представлений о механических и структурных аспектах трещиностойкости. Обобщены литературные сведения о количественных характеристиках трещиностойкости, необходимых для изучения закономерностей упруго-пластического разрушения металлов. Рассмотрены наиболее распространенные силовые, деформационные и энергетические характеристики трещиностойкости, отмечены их достоинства и недостатки. Признано, что наиболее перспективными характеристиками трещиностойкости материала в упруго-пластическом состоянии с точки зрения их объективности, а также простоты определения и удобства использования в расчетах на прочность элементов конст-

рукций с трещинами являются критические напряжения  $\sigma_c$  и предел трещиностойкости  $I_c$ . Сделан вывод о необходимости разработки наиболее рациональной методики определения указанных критериев.

Проведен анализ основных параметров и особенностей микроструктуры, определяющих трещиностойкость: размера зерна (субзерна); природы твердого раствора (легирования, в том числе содержания углерода); типа и распределения структурных составляющих, в том числе упрочняющих частиц карбонитридов; морфологии и распределения неметаллических включений. Рассмотрено отдельно влияние каждого фактора.

Отмечено, что большинство исследований, посвященных изучению структурных аспектов трещиностойкости, относится к вопросам развития трещины в условиях максимальной стесненности пластических деформаций.

Приведены литературные данные о связи трещиностойкости и прочностных свойств сталей в области хрупких состояний (о диаграмме конструктивной прочности " $K_{Ic} - \sigma_{ag}$ ") и подчеркивается необходимость развития аналогичных представлений для области упруго-пластических состояний материалов.

Во второй главе формулируются цель и задачи исследования; обоснован выбор материала и описаны методы исследования.

Выбор материала обусловлен целью работы. Исследования проводили на углеродистых и низколегированных сталях, находящих широкое применение в сельскохозяйственном, транспортном и других отраслях машиностроения: 09Г2, 09Г2С, 18Гпс, СтЗсп, 30, 45 и 75, а также на сталях с карбонитридным упрочнением 06Г2АФ и 14Г2АФ, возможности применения которых в указанных отраслях изучаются. Все стали были промышленной выплавки и поставлены в виде листового горячекатаного проката в соответствии с действующими ГОСТами и ТУ.

Влияние термической обработки на трещиностойкость углеродистых и низколегированных сталей при статическом нагружении изучали на сталях 09Г2С, 18Гпс, 30, 45 и 75. Применяли наиболее распространенную для данных сталей технологию термической обработки, состоящую из заковки и последующего отпуска, температуру которого варьировали в пределах  $200 + 650^{\circ}\text{C}$ .

Пределы прочности, текучести, относительное удлинение и су-

жение исследованных сталей определяли при испытании на одноосное статическое растяжение плоских образцов.

Трещиностойкость сталей (максимальную разрушающую нагрузку образца с трещиной  $P_{max}$ ) при статическом нагружении определяли на машинах "Fritz Heckert" EP 100 и ЕЛЗ 40 (ГЛР). Скорость перемещения захватов составляла 4 мм/мин. Испытывали образцы всех основных типов, рекомендуемые для оценки трещиностойкости листовых металлов: с центральной трещиной на осевое растяжение, с краевой трещиной на осевое растяжение, прямоугольные образцы на внецентренное растяжение, плоские образцы с краевой трещиной на сосредоточенный изгиб. Ширину образцов ( $b$ ) варьировали от 50 до 200 мм. Длину трещины изменяли в пределах от 0,1 до 0,7 ширины образца. Испытания проводили при  $+20^{\circ}$  и  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Циклическую трещиностойкость стали определяли на универсальной испытательной машине ГРМ-I. Слежение за ростом трещины осуществляли визуально через микроскоп с 10-кратным увеличением. Испытывали плоские образцы с краевой трещиной на осевое растяжение шириной 100 мм. Коэффициент асимметрии цикла нагружения варьировали от 0,2 до 0,8.

Для изучения трещиностойкости элементов несущих систем сельхозмашин - гнутых замкнутых сварных профилей квадратного сечения разработана методика, включающая проведение испытаний при статическом и циклическом приложении нагрузки. Нагружение профилей осуществляли по схеме прямого чистого изгиба на машине ГРМ-I. Определение статической трещиностойкости профилей ( $P_{max}$ ) проводили при варьировании длины создаваемой усталостной трещины длиной от 0,1 до 0,6 периметра поперечного сечения. Трещину наносили перпендикулярно направлению продольной оси профиля и действию максимального растягивающего напряжения. Типоразмеры профилей изменяли с учетом возможности их производства на промышленных профилегибочных станах и применения в рамных конструкциях сельхозмашин.

Для оценки влияния внутренних напряжений на статическую и циклическую трещиностойкость профилей промышленного изготовления, при нагружении проводили их тензометрирование в отожженном виде и в состоянии поставки.

Рельеф поверхности изломов исследовали на электронном микроскопе "Тесла 242-Е" методом одноступенчатых угольных реплик

при увеличении  $\times 4000$ .

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с определением трещиностойкости сталей при статическом нагружении в условиях развитой упруго-пластической деформации.

Выбор характеристики трещиностойкости был основан на том принятом в работе положении, что данная характеристика должна выполнять одновременно две функции: служить мерой трещиностойкости металла при изучении закономерностей разрушения и находить простое и надежное применение в расчетах на прочность конструкций с трещинами.

Исходя из этого, выяснена роль искомой характеристики в схеме расчета. Если требуется провести расчет на прочность тел с трещинами, то необходимо характеризующие этот расчет параметры, такие как величина и характер прикладываемой нагрузки, форма и размеры сечения, длина трещины, связать в некоторую функциональную зависимость  $\Lambda$ , значение которой в критическом состоянии конструкции  $\Lambda_c$  должно быть известно из эксперимента.

При расчете на трещиностойкость стараются найти такие параметры  $\Lambda_c$ , которые являются свойством только самого материала, независимо от того, изготовлен ли из него образец (об) с простой геометрической формой или сложный элемент конструкции (к). Следовательно, экспериментально-расчетные работы построены на использовании двойного равенства

$$\Lambda^{об} = \Lambda_c = \Lambda^к \quad (1)$$

В области хрупких разрушений роль  $\Lambda_c$  играет величина  $K_{Ic}$ , служащая одновременно характеристикой трещиностойкости материала. Тогда условие расчета запишется в виде

$$\Lambda_c = K_{Ic} = const \quad (2)$$

Проведенный анализ показал, что характеристики трещиностойкости в упруго-пластическом состоянии материала не могут быть использованы непосредственно для расчета, как это делается с характеристиками трещиностойкости в случае хрупкого разрушения. В общем случае для расчета необходимо нахождение некоторой величины  $\Lambda_c$ , названной конструкционной трещиностойкостью, которая является инвариантной мерой трещиностойкости для образца и рассчитываемого элемента конструкции. Показано, что вся задача определения трещиностойкости элементов конструкций в упруго-

пластическом состоянии распадается на две части: определение трещиностойкости материала на стандартных образцах ( $M_c$ ) и нахождение инвариантной меры трещиностойкости для образца и конструкции с помощью характеристики трещиностойкости материала ( $M_c$ ) и функции  $\psi$ , которую называли конструкционным фактором и определили основные параметры, от которых она зависит. Таким образом общее выражение для конструкционной трещиностойкости имеет вид

$$\Lambda_c = M_c \cdot \psi(b, e, x) \quad (3)$$

где  $b$  — характерный геометрический параметр элемента конструкции, равный максимально возможной длине трещины, образующейся в нем при данных условиях нагружения;

$e$  — текущая длина трещины;

$x$  — некоторая характеристика, зависящая от выбора  $M_c$  и характеризующая механические свойства материала, неповрежденного трещиной.

Используя в качестве  $M_c$  предел трещиностойкости  $I_c$ , в работе на основе  $\Lambda_c$  проведен расчет тонкостенных элементов конструкций, выполненных из низкопрочных высокопластичных сталей 09Г2, 06Г2АФ и 14Г2АФ, разрушавшихся с образованием значительных пластических деформаций. В простейшем случае, когда образец и элемент конструкции различаются только шириной ( $b$ ), экспериментально показано, что при идентичном нагружении конструкционный фактор  $\psi(b, e, x)$  является функцией только одного параметра  $b$  и равен  $1/\sqrt{b}$ ; если отличие состоит только в толщине сечения, то  $\psi(x) = 1/\sigma_b$ , где  $\sigma_b$  — предел прочности материала в элементе конструкции, неповрежденном трещиной, при данных условиях нагружения. Так для изгиба показано, что  $\sigma_b = \sigma_{bu}$  ( $\sigma_{bu}$  — предел прочности материала при испытании на изгиб).

При расчете замкнутых профилей в условиях изгибающих нагрузок, используя в качестве  $M_c$  характеристику  $\sigma_c$ , находим, что  $\psi(b, e, x) = \psi(b, e) = \sqrt{e/b}$ , где  $b$  для профиля равно 3/4 периметра сечения, а для плоского образца — его ширине, что физически оправдано. При этом, если длина трещины ( $e$ ) в профиле находится в пределах одной полки профиля, то моделирующими условиями напряженного состояния профиля являются образцы с центральной трещиной на осевое растяжение; если трещина вышла за пределы одной грани и распространилась на смежные, то модели-

рующими образцами являются образцы с краевой трещиной на сосредоточенный изгиб.

Принимая  $M_c = \sigma_c$ , получаем в расчете то преимущество, что отпадает необходимость знать выражение  $Y$  - тарировки элемента конструкции, которую необходимо иметь, принимая  $M_c = I_c$ . Однако в последнем случае задача упрощается с другой стороны - возможностью проведения испытаний образцов только одного типа, который будет обусловлен способом нагружения элемента конструкции.

Учитывая, что концепция предела трещиностойкости  $I_c$  и связанных с ним критических напряжений  $\sigma_c$  ранее подтвердилась в расчетах на прочность крупногабаритных толстостенных конструкций с трещинами, выбор в качестве основных характеристик трещиностойкости  $I_c$  и  $\sigma_c$  можно считать целесообразным.

Для определения наиболее предпочтительной геометрии образца и схемы нагружения с целью сравнительного анализа и изучения трещиностойкости металлов рассмотрены факторы, за счет которых складывается результирующая прочность образца с трещиной -  $\sigma_c$ . Для металла нечувствительного к трещине остаточная прочность ( $\sigma_c$ ) уменьшается линейно с увеличением длины трещины и равна максимально реализуемой прочности в таких условиях:  $\sigma_c = \sigma_c^{(r)} = \sigma_b(1 - e/8)$ . В общем случае падение прочности происходит и за счет влияния собственно трещины как концентратора напряжений. Это влияние также на некоторую часть  $\omega_c$  уменьшает исходную прочность гладкого образца  $\sigma_b$  при данных условиях нагружения. Следовательно,

$$\sigma_c = \sigma_c^{(r)} - \omega_c \cdot \sigma_b \quad (4)$$

Величину  $\omega_c$  предложили использовать в качестве характеристики чувствительности материала к трещине. Ясно, что чем больше  $\omega_c$ , тем ниже  $\sigma_c$  и тем объективнее оценивается трещиностойкость металлов при испытании.

Проведенные исследования образцов различных типов при широком изменении длины трещины и их размеров показало, что наиболее предпочтительными являются образцы с краевой трещиной на сосредоточенный изгиб. При этом максимальная чувствительность образца к трещине наблюдается в интервале  $e/8 = 0,2 + 0,5$ . Соблюдая преемственность с определением  $K_{Ic}$ , для быстрой и удобства определения трещиностойкости в упруго-пластическом состоянии материала, следует рекомендовать  $e/8 = 0,5$ .

Исследование чувствительности односторонних образцов к трещине в связи с варьированием их размеров показало практически одинаковую их чувствительность к трещине -  $\omega_c$ . Поэтому для единообразия проведения испытаний целесообразно использовать какую-либо определенную ширину, например, 100 мм.

В четвертой главе изложены результаты исследований влияния термической обработки и химического состава на трещиностойкость углеродистых и низколегированных сталей.

Совокупность полученных данных позволяет установить, что расположение исследованных низколегированных и малоуглеродистых сталей (09Г2(С), СтЗсп, 18Гпс, 06Г2АФ) в порядке возрастания их абсолютных значений трещиностойкости  $I_c$  и  $\sigma_c$  как при изгибе, так и при растяжении, одинаково. В частности, максимальная трещиностойкость наблюдается у стали 06Г2АФ, однако реализация этого преимущества при разных способах нагружения различна. При изгибе оно достигается только за счет более высокой начальной прочности  $\sigma_b$  (так как у всех сталей  $\omega_c$  имеет одинаковую величину). При растяжении же преимущество в трещиностойкости обусловлено не только более высоким пределом прочности  $\sigma_b$ , но и намного меньшей - в 1,5-2 раза - чувствительностью стали 06Г2АФ к трещине по сравнению с другими сталями.

Навелирование роли трещины как концентратора напряжений при изгибе следует признать некоторым общим свойством. Так, испытание стали 09Г2 с разными прочностными свойствами, полученными в результате закалки и отпуска на различные температуры, показали, что при изгибе в отличие от растяжения значения  $\omega_c$  стали 09Г2С не зависят от режима термической обработки. В то же время абсолютные значения трещиностойкости ( $I_c$  и  $\sigma_c$ ) этой стали как при изгибе, так и при растяжении, зависят от режима термической обработки. Таким образом полный анализ трещиностойкости сталей при статическом нагружении возможен на основе четырех взаимосвязанных параметров:  $\sigma_c$ ,  $I_c$ ,  $\sigma_c/\sigma_b$  и  $\omega_c$ .

Проведено сравнение трещиностойкости с другими механическими свойствами. Показан сложный, труднопредсказуемый характер влияния стандартных механических свойств на трещиностойкость углеродистых и низколегированных сталей. Поэтому для определения трещиностойкости металлов в упруго-пластическом состоянии необ-

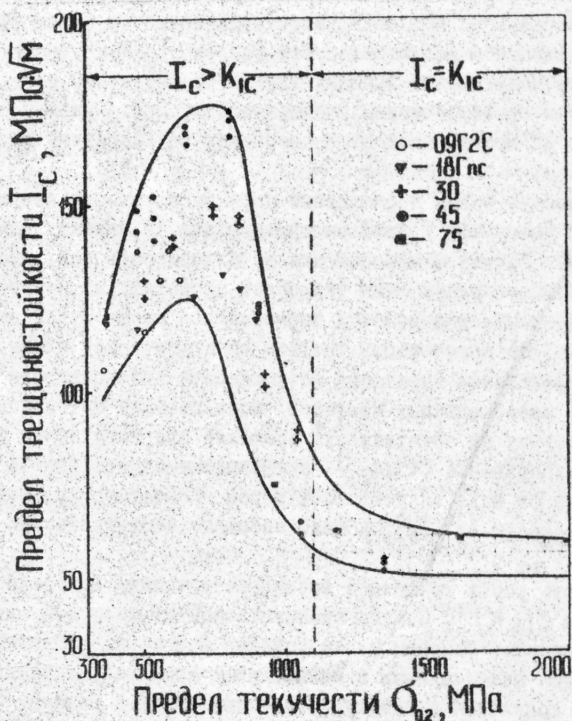
ходимо иметь свои параметры; в работе в качестве такого параметра предлагается  $\omega_c$ , который определяется путем специально поставленного эксперимента.

При анализе влияния термической обработки на трещиностойкость стали 75, разрушение которой является хрупким, установлено, что с ростом температуры отпуска вязкость разрушения ( $K_{Ic}$ ) монотонно возрастает. Это находится в согласии с известными представлениями. В то же время при упруго-пластическом разрушении трещиностойкость сталей в зависимости от температуры отпуска имеет экстремальный характер, хотя характеристики прочности ( $\sigma_{0.2}$  и  $\sigma_b$ ) и пластичности ( $\delta$  и  $\psi$ ) с ростом температуры отпуска соответственно монотонно уменьшаются и увеличиваются. Таким образом увеличение пластичности при разрушении в условиях значительных пластических деформаций, несмотря на то, что и обеспечивает всегда более высокую степень релаксации напряжений в вершине трещины, приводит к увеличению трещиностойкости лишь в области хрупких разрушений. В области упруго-пластических разрушений трещиностойкость с увеличением пластичности растет только до известного предела. Так для стали 09Г2С это соответствует температуре  $200 \div 300^\circ\text{C}$ , для стали 18Гпс -  $250 \div 350^\circ\text{C}$ , для стали 30 -  $300 \div 400^\circ\text{C}$ , для стали 45 -  $400 \div 500^\circ\text{C}$ , для стали 75 -  $600 \div 650^\circ\text{C}$ .

Таким образом широкое варьирование содержания углерода позволило установить, что при переходе от низко- к средне- и далее к высокоуглеродистым сталям максимальный уровень трещиностойкости достигается при более высокой температуре отпуска. Повышение температуры выше оптимальной приводит к такому разупрочнению сталей, что эффекты, связанные с увеличением трещиностойкости за счет пластичности, уже подавляются значительным падением прочности. Подобные закономерности объясняются особенностями микро- и субструктуры сталей разного состава.

В настоящее время при выборе и анализе металлов исключительное значение имеют диаграммы конструктивной прочности в координатах " $K_{Ic} - \sigma_{0.2}$ ". В то же время очевидна необходимость наглядной связи характеристик трещиностойкости и прочности для материалов с вязким на практике характером разрушения. Следовательно, целесообразно иметь диаграмму, связывающую характеристики трещиностойкости с прочностью при всех видах разрушения. Для

сохранения единой взаимосвязи характеристика трещиностойкости должна автоматически переходить в  $K_{IC}$ , если условия разрушения этому соответствуют. Такой характеристикой является предел трещиностойкости. На рисунке изображена диаграмма " $I_c - \sigma_{0.2}$ ", которую назвали обобщенной диаграммой конструктивной прочности, поскольку  $I_c$  является более обобщенной характеристикой по сравнению с  $K_{IC}$ . Данная диаграмма построена впервые. На рисунке видно, что трещиностойкость низкопрочных сталей имеет для каждой из них при некотором уровне предела текучести максимум, существование которого объясняется определенным сочетанием комплекса механических характеристик прочности и пластичности. Можно полагать, что подобная диаграмма будет типичной для всех других сталей, независимо от вида их разрушения.



Обобщенная диаграмма конструктивной прочности сталей 09Г2С, 16Гнс, 20, 45, 75.

В пятой главе приведены результаты исследования закономерностей разрушения низколегированных сталей (09Г2 и 14Г2АФ) в элементах несущих систем сельхозмашин при статическом и циклическом нагружении.

При испытании замкнутых квадратных профилей установлены допустимые длины трещин в рамных конструкциях ряда сельхозмашин (плуги общего назначения, культиваторы, бороны) в условиях максимальной эксплуатационной нагруженности. Показано, что критическая длина трещин может достигать более  $\frac{1}{4} + \frac{1}{3}$  периметра сечения. Расчет критической длины трещины на основе представления о конструкционной трещиностойкости  $\Lambda_c$  по испытаниям стандартных образцов совпал с результатами натурных испытаний профилей. Для несущего бруса культиватора УСМК-Б,4Б, представляющего собой профиль типоразмера 140х140х7, изготавливаемый из стали 09Г2, экспериментальным и расчетным путем (через  $\Lambda_c$ ) показано, что несущий брус может иметь трещину длиной не менее 150 мм в наиболее опасном месте сечения. Следовательно, время распространения трещины до критической длины оставит безаварийный ресурс работы машины.

В настоящее время нормативный срок эксплуатации несущего бруса (2450 часов или 7 лет) рассчитывается по моменту зарождения трещины. Поэтому можно снизить металлоемкость так, что зарождение видимого разрушения уже будет проходить на некотором этапе эксплуатации и доработка нормативного срока будет как раз представлять время роста трещины до критической длины.

Для определения выражения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) исследованных профилей использовали метод податливости. Поскольку на податливость профилей при нагружении влияют внутренние напряжения ( $\sigma_{внутр}$ ), коэффициент интенсивности  $K$  будет в неявном виде их учитывать через  $\gamma$ -тарировку, которую ввиду зависимости от  $\sigma_{внутр}$  целесообразно обозначать как эффективную  $\gamma_{эф}$ .

Скорость роста трещины в бруссе рассчитывали по уравнению Париса:  $\dot{U} = C(\Delta K)^n$ . Спектр эксплуатационных нагрузок, действующих в наиболее опасном месте сечения бруса, представлял ряд распределения максимальных и минимальных значений напряжений по частоте их появления в минуту в наиболее тяжелых режимах эксплуатации.

Расчет времени роста трещины осуществлен на ЭВМ ЕС-1033. Алгоритм и программа расчета предусматривали определение времени эксплуатации бруса с трещиной до разрушения на основе испытаний только стандартных образцов.

Фрактографические исследования поверхности излома несущего бруса показали, что распространение трещины происходит с образованием бороздчатого рельефа излома, характерного для усталостного разрушения. С ростом длины трещины, то есть с повышением нагруженности сечения бруса, увеличение скорости распространения трещины происходит как вследствие уменьшения числа циклов нагружения, приходящихся на шаг бороздки, так и вследствие увеличения самого шага бороздок.

Экспериментально показано, что полученное выражение КИН профиля, позволяет вычислить скорость распространения трещины в профиле в широком интервале изменения его периметра и толщины сечения. На основании результатов расчета времени роста трещины в несущем брусе различного поперечного сечения, которое варьировали с учетом ограничений, накладываемых унификацией рабочих органов, закрепляемых на брус, разработаны рекомендации по снижению металлоемкости бруса за счет уменьшения толщины его стенки.

Показана целесообразность уменьшения толщины стенки профиля I40xI40x7 мм до 5 мм, то есть замены данного профиля на серийно освоенный аналогичный профиль I40xI40x5 мм. Время работы бруса I40xI40x5 мм, включая время его эксплуатации с трещиной в процессе роста трещины до критической длины, составит 2603 часа при нормативном сроке работы культиватора 2450 часов.

### В ы в о д ы

I. Исследованы закономерности разрушения углеродистых и низколегированных сталей в упруго-пластическом состоянии и показано, что в этих условиях их трещиностойкость является важной характеристикой конструктивной прочности. Оценку трещиностойкости с точки зрения объективности, наибольшей простоты и удобства целесообразно проводить на основе критических напряжений ( $\sigma_c$ ) и предела трещиностойкости ( $I_c$ ). Разработана методика определения критических напряжений и предела трещиностойкости, в которой учтены рациональный выбор геометрии образца и способа

его нагружения при широком варьировании длины усталостной трещины.

2. Показано, что уменьшение начальной прочности материала ( $\Delta$ ) при наличии трещины происходит не только за счет потери прочности, связанной с уменьшением нетто-сечения ( $\omega_n$ ), но и вследствие влияния собственно трещины как предельно острого концентратора напряжений ( $\omega_c$ ), то есть  $\Delta = \omega_n + \omega_c$ . Параметр  $\omega_c$  предложено использовать в качестве характеристики чувствительности материала к трещине.

3. Предложено для расчетов на прочность элементов конструкций с трещинами ввести представление о конструкционной трещиностойкости  $\Lambda_c$ , являющейся инвариантной мерой трещиностойкости для образца и элемента конструкции. Справедливость этого представления подтверждена экспериментально.

4. Максимально высокая трещиностойкость закаленных углеродистых и низколегированных сталей в зависимости от содержания углерода достигается при различных температурах отпуска. С уменьшением содержания углерода, благодаря росту запаса пластичности стали, оптимальная температура отпуска снижается.

5. Впервые для описания трещиностойкости конструкционных сталей предложена обобщенная диаграмма конструктивной прочности, построенная в координатах "предел трещиностойкости ( $I_c$ ) - предел текучести ( $\sigma_{0.2}$ )". Эта диаграмма отражает взаимосвязь трещиностойкости с пределом текучести материала при любой степени стесненности пластических деформаций.

6. В области упруго-пластического разрушения, в которой  $I_c > K_{Ic}$ , имеется экстремум трещиностойкости, тогда как в области хрупких разрушений, где  $I_c = K_{Ic}$ , с увеличением прочности ( $\sigma_{0.2}$ ) трещиностойкость непрерывно понижается. Следовательно, в случае вязкого разрушения трещиностойкость с увеличением пластичности растет только до известного предела.

7. Установлено, что гнутые замкнутые профили, широко применяемые в тяжело нагруженных рамных конструкциях сельхозмашин, при максимальной эксплуатационной нагруженности сохраняют свою работоспособность при наличии трещины длиной, равной  $\frac{1}{3} + \frac{1}{4}$  периметра сечения.

8. Показана возможность уменьшения толщины стенки несущего бруса культиватора УСМК-5,4Б на 2 мм за счет снижения коэффициента запаса прочности бруса.

Время эксплуатации машины в течение всего нормативного срока службы будет включать в себя время развития усталостной трещины. Экономический эффект составил 81,1 тыс.руб. в год.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Анохин А.А., Лобань В.А. Исследование вязкости разрушения малоуглеродистых сталей. - Труды / МВТУ, 1983, №403, с.79-86.

2. Анохин А.А., Смирнов В.М., Васильева А.Г. Исследование надежности и долговечности несущих систем сельскохозяйственных машин при наличии в них трещин. - Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов: Материалы докл. научно-техн.семинара. - Ленинград, 1983, с.10-14.

3. Исследование параметров трещиностойкости гнутых замкнутых сварных профилей. / В.Н.Федоров, А.А.Анохин, М.Н.Георгиев, В.М.Смирнов. - Тез.докл.Производство и применение экономных профилей проката для тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. Всесоюзн.научн.-техн.конф.Днепропетровск, 1983, с.42.

4. Анохин А.А., Георгиев М.Н., Васильева А.Г. Оценка статической трещиностойкости пластичных сталей. - Изв.ВУЗов. Машиностроение, 1984, №1, с.119-122.

