

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

С.В. Гладковский, С.И. Кумков (Екатеринбург)

Abstract

The comparative analysis of experimental dependence between the values of impact and static fracture toughness of high-strength Fe-Cr-Ni-based maraging steels is performed. The usage of minimax method for evaluation of data volume with large level of error and uncertainty areas makes it possible to exclude extremal measurements and establish fine approximation of fracture toughness dependence as a function of impact toughness. It is pointed out that the type of an approximation function is changing at the certain values of impact toughness which is attributed to the alteration of main fracture mechanism. Three types of equations for numerical prediction of fracture toughness parameters (K_{IC}) are proposed.

1. Введение

Разброс данных различных механических испытаний металлов и сплавов, связанный с особенностями методики эксперимента и неоднородностью химического и структурного состава отдельных образцов, в значительной степени осложняет графическое и аналитическое представление результатов, а также их физическую интерпретацию. Повышенный разброс механических характеристик ударной вязкости может наблюдаться в критических областях (например, вблизи температуры выраженного вязкохрупкого перехода) [1]. Отрицательное влияние нестабильности экспериментальных результатов в наибольшей степени проявляется при использовании методов микромеханического моделирования характеристик сопротивления разрушению (статическая трещиностойкость K_{IC}) по данным более простых механических испытаний [2]. В последнем случае при построении аналитических зависимостей типа $K_{IC} = f(N)$ (где N - набор стандартных и нормированных механических свойств, полученных при испытаниях на растяжение или ударный изгиб) приходится принимать во внимание наличие значительного и неоднозначного по величине разброса двух независимо определяемых механических параметров.

Исходя из синергетических представлений о процессах деформирования и разрушения материалов [3], можно предположить, что тип функциональной зависимости между механическими характеристиками материала может резко меняться в так называемой точке бифуркации, определяющей возможность качественного перехода материала из одного состояния в другое и, в частности, смены доминирующего механизма разрушения.

Анализ результатов такого типа обычно проводится методом наименьших квадратов (МНК). Однако указанное изменение механизма разрушения усложняет тип

аппроксимирующей функции $K_{IC} = f(N)$ и затрудняет использование МНК для аппроксимации функций, единой для всего диапазона экспериментальных значений.

Целью настоящего исследования является изучение возможности прогнозирования характеристик трещиностойкости сталей по значениям ударной вязкости с использованием современных математических методов аппроксимации в условиях неопределенности статистических свойств ошибок замеров с учетом данных фрактографического анализа о механизмах разрушения.

2. Описание эксперимента

В качестве объекта исследования были выбраны 18 составов опытных и промышленных плавок мартенситно-стареющей стали типа Fe-11Cr-9Ni-2Mo. Характеристики ударной вязкости (KCU), статической трещиностойкости (K_{IC}) и стандартные механические свойства определялись на призматических образцах с U-образным надрезом (10x10x55 мм), компактных CT-образцах толщиной 12 мм и разрывных образцах диаметром 5 мм согласно рекомендациям ГОСТов 1497-84, 9454-84, 25.506-85. Испытания проводились на универсальных машинах Инстрон-1195, EUS-20 и маятниковом копре МК-30 при температуре 20°C. Для проведения микрофрактографического анализа использовался растровый электронный микроскоп JSM-U3. Все образцы были одинаково ориентированы относительно оси заготовки и подвергались закалке и упрочняющему старению в интервале температур 480-525°C с выдержкой 3 ч. Значения предела прочности за счет изменения содержания в различных плавках при одинаковой технологии выплавки Mo = 1,55-2,14%; Ti = 0,35-1,47%; Al = 0,09-0,95%; Cu = 0,10-0,48% варьировались в интервале $\sigma_b = 1500-1900$ МПа. Базовые экспериментальные значения K_{IC} и KCU рассчитывались как средние арифметические по данным испытаний 3-5 образцов. Специальные испытания двух серий из 10 идентичных образцов позволили выявить связанные с методическими особенностями процедуры испытаний различия в среднестатистическом разбросе $K_{IC} \pm 0,025$ МДж/м² ($\pm 0,25$ кгс·м/см²) и $K_{IC} \pm 3,1$ МПа·м^{1/2} (± 10 кгс/мм^{3/2}). Анализ экспериментальных данных не выявил единой для всех составов сталей зависимости между отдельными механическими свойствами при испытаниях на разрыв, с одной стороны, и параметрами сопротивления разрушению (K_{IC}) с другой. Вместе с тем для изученных составов стали была обнаружена ярко выраженная зависимость между значениями K_{IC} и KCU. Полученный массив экспериментальных данных показан на рис.1, замеры отмечены знаком "крест" (см. рис.1,а) прямоугольники с пунктирной границей означают области неопределенности замеров (см. рис.1,б). При обработке первичных данных использовались внесистемные размерности параметров K_{IC} [кгс/мм^{3/2}] и KCU [кгс·м/см²], в единицах которых были протарированы испытательные машины.

В первом приближении было принято, что наблюдаемая зависимость между этими двумя свойствами сталей описывается уравнением линейного типа. С использованием МНК были определены оптимальные коэффициенты аппроксимирующей прямой на всем диапазоне значений KCU. Данная аппроксимирующая прямая нанесена на рис.1. Однако максимальное отклонение замеров K_{IC} от этой прямой достигает 42,8 кгс/мм^{3/2}, что в 4,3 раза больше максимальной ошибки измерений (10 кгс/мм^{3/2}). При линейной аппроксимации всего массива данных после предварительной обработки превышение составляет 2,2 раза. Таким образом, ошибка аппроксимации велика, и

линейная аппроксимация не может быть применена на всем интервале значений КСУ. Это подтверждает указанную ранее нестационарность доминирующей модели разрушения и требует перехода к более тонкой аппроксимации результатов по участкам, характерным для каждого типа микромеханизма разрушения (квазискольный, смешанный и вязкий).

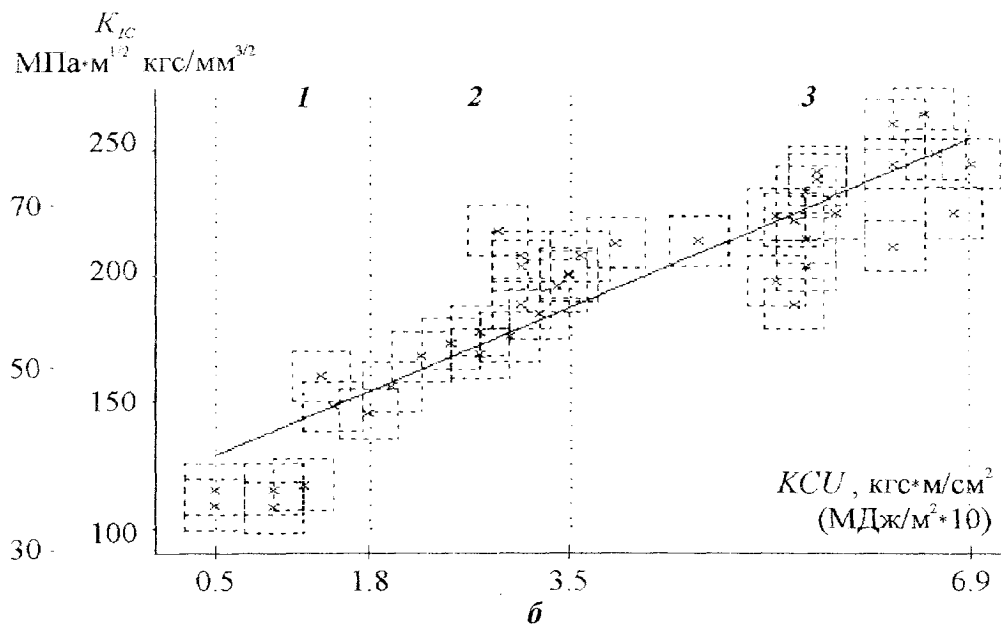
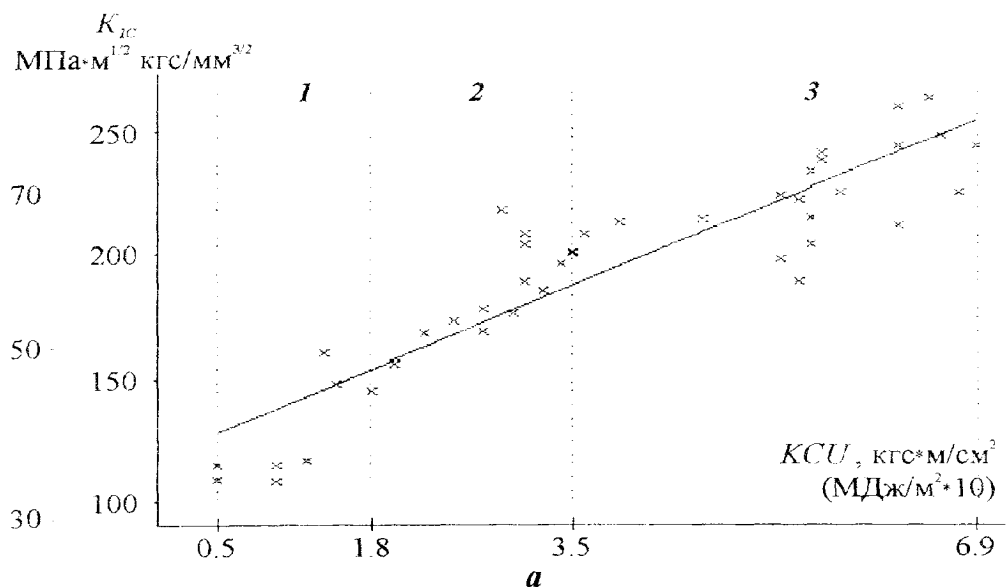


Рис. 1. Исходные данные: а - замеры, б - области их неопределенности

Следует отметить, что в литературе отсутствуют данные о линейном характере связи между параметрами K_{IC} и KCU . Так, при сопоставлении указанных значений в сравнительно узком интервале $K_{IC} \sim 80-110$ МПа для стали ОЗХ10М2Т предложена [4] универсальная степенная зависимость вида $K_{IC} = A \cdot (KCV/\sigma)^\alpha$, здесь KCV - ударная вязкость разрушения образцов с V-образным надрезом. При изучении свойств высокопрочной стали на основе Н18К9 для оценки трещиностойкости в работе [5] предложена функция $K_{IC} = A \cdot (0,3KCV \cdot E)^{0,5}$.

Более тщательный анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1, показал, что линейный характер полученных значений наблюдается в средней части условной кривой, а в областях низкой ($KCU < 1,7-1,9$ кгс·м/см²) и повышенной ($KCU > 3,4-3,6$ кгс·м/см²) ударной вязкости наблюдается отход от линейности и повышенный разброс данных.

Использование электронной фрактографии (рис. 2) при анализе изломов изученных сталей показало, что изменение функциональной зависимости параметров разрушения в указанных выше областях ударной вязкости имеет определенное физическое истолкование. Так, на участке 1 (см. рис. 1) механизм разрушения сталей является преимущественно квазискользящим (рис. 2, а), а на участке 3 высоких значений KCU и K_{IC} - типично вязким (рис. 2, в). На среднем участке 2 процессы разрушения развивались по смешанному механизму (рис. 2, б). При этом составы исследованных сталей и режимы термической обработки были выбраны так, что для всех случаев сохранялся постоянным как размер исходного аустенитного зерна, так и транскристаллитный макромеханизм разрушения.

Анализ изломов изученных образцов, данных по химическому составу и режимам термической обработки позволил установить некоторые особенности процессов разрушения сталей в трех рассмотренных участках зависимости K_{IC} от KCU (см. рис. 1):

- левый отрезок (участок 1) является областью структурного повреждения металла, связанной с достижением предельного содержания титана и алюминия и соответствующей закритической плотности упрочняющих интерметаллидных частиц. В этой области лимитирующей стадией процесса разрушения является первичный скачок трещины в микропластической зоне впереди ее фронта. В этом случае возможный прирост ударной вязкости в макрообъеме образца не вызывает повышения трещиностойкости стали;

- рассматривая отрезок в средней области (участок 2), можно предполагать, что в результате изменения соотношения участков квазисколла и вязких ямок с различной энергоемкостью разрушения, процесс роста трещины реализуется автомодельно [3], и это определяет линейный характер взаимосвязи параметров и KCU . Такой тип зависимости между данными параметрами установлен впервые;

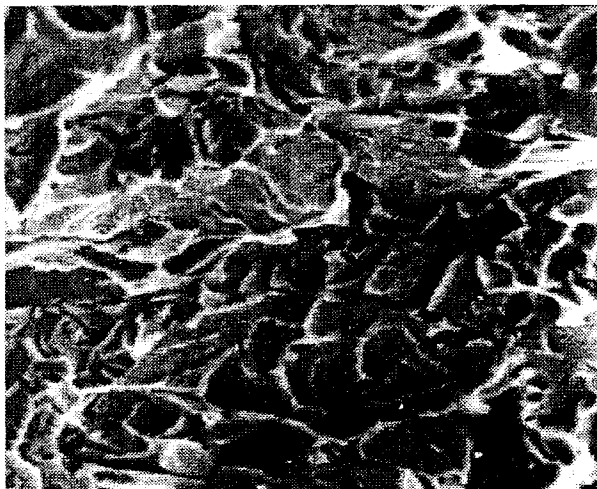
- на правом отрезке (участок 3) наибольший вклад в энергоемкость вязкого разрушения вносят процессы на макроуровне, и прирост ударной вязкости, связанный главным образом с изменением чистоты металла, ростом доли крупных ямок, повышением количества ревертированного аустенита и влиянием других структурных факторов, не сопровождается ростом локального критерия разрушения сталей (K_{IC}).

Таким образом, для обработки экспериментальных данных были выделены три участка с возможным типом связей между K_{IC} и K_{CU} , который определяется доминирующим механизмом разрушения: начальный участок - аппроксимация степенной функцией; средний - аппроксимация прямой; правый участок - полуквадратической параболой (области 1, 2 и 3, рис. 1).

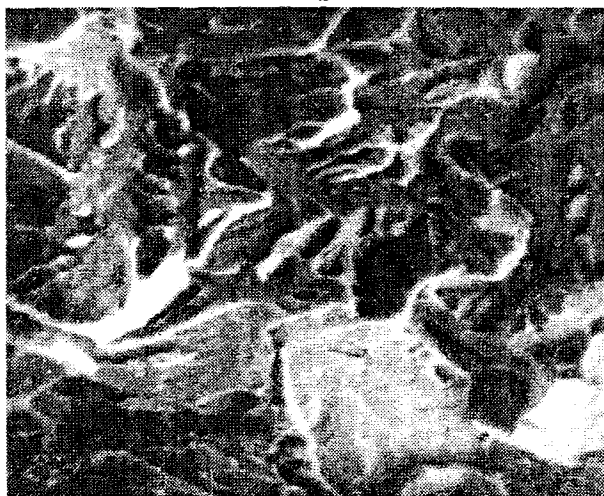
3. Постановка задачи аппроксимации

Существующие методы обработки зашумленных экспериментальных данных опираются на процедуры математической статистики, в которых принципиальным является знание вероятностных характеристик ошибки измерения и достаточный объем выборки. При этом результаты представляются в виде точечной оценки в пространстве параметров данной функции с соответствующими доверительными интервалами оценок при заданном уровне доверительной вероятности.

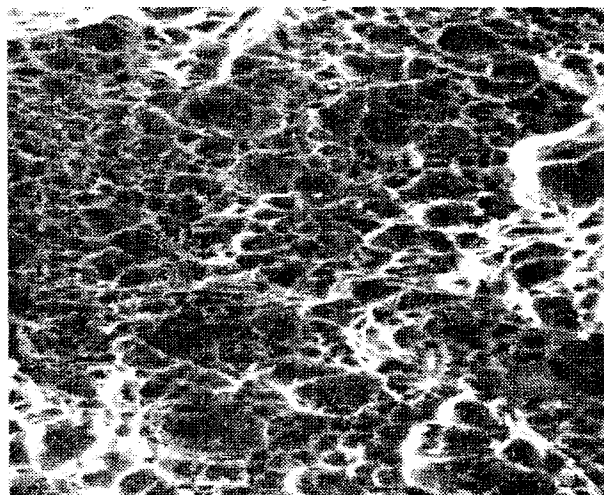
В рассматриваемом случае данные характеризуются малым объемом выборки, вероятностные характеристики ошибок измерений неизвестны, приближенно задана лишь максимальная величина ошибки замера. В таких условиях применение методов статистической обработки является необоснованным.



а



б



в

Рис. 2. Микрофрактограммы изломов (увеличение: $\times 700$ - а, в; $\times 1000$ - б)

Поэтому для обработки экспериментальных данных и построения аппроксимирующих зависимостей применялся метод, разработанный в институте математики и механики УрО РАН. В методе используются основные положения теории оптимального наблюдения в условиях неопределенности информации [6] и минимаксные процедуры оценивания.

Первоначально данный подход разрабатывался для задач оценивания состояния и управления динамическими системами [7]. Его применение к рассматриваемой задаче, где аппроксимирующая кривая задается в явном виде конечными соотношениями, позволяет создавать более эффективные процедуры. Разработанные алгоритмы и вычислительные программы были опробованы на задачах аппроксимации реальных экспериментальных данных. Подход был расширен на более общий случай, когда с ошибкой автономно замеряются значения двух параметров (как на рис. 1б).

Рассмотрим суть предлагаемого подхода. Пусть на последовательности значений аргумента $\{x_i, i = 1, N\}$ задана выборка $\{F_i = F(x_i, p)\}$ замеров и максимальная величина ошибки замера ε_m . При этом каждый замер характеризуется своим множеством неопределенности $G_i = [F_i - \varepsilon_m, F_i + \varepsilon_m]$. Данное множество является доверительным интервалом замера F_i , то есть содержит истинное значение измеряемого процесса. Задан тип аппроксимирующей кривой $L(x, p)$, которая определяется вектором своих параметров p . Значение вектора параметров называется допустимым, если при подстановке его в выражение кривой $L(x, p)$ для всех значений аргумента из набора $\{x_i\}$ выполняется условие $L(x_i, p) \in G_i$.

Назовем информационным множеством (ИМ) совокупность всех допустимых значений параметров. Будем определять ИМ как пересечение $I = \bigcap I_{i,j,\dots,m}$, где $I_{i,j,\dots,m}$ - парциальное информационное множество, соответствующее группе множеств неопределенности $\{G_i, G_j, \dots, G_m\}$ для $i, j, \dots, m = 1, N$ и $i \neq j \neq \dots \neq m$. Каждое такое ИМ определяет допустимое множество значений параметров, при которых кривая проходит через соответствующие множества неопределенности $\{G_i, G_j, \dots, G_m\}$. В настоящей работе парциальные ИМ определялись только через парные комбинации $\{G_i, G_j\}, i \neq j$ множеств неопределенности для значений замеров КСУ без учета их разбросов.

Указанная операция пересечения выделяет совокупность только тех значений параметров, которые дают прохождение аппроксимирующей кривой через все множества неопределенности. При этом результирующее информационное множество I параметров определяет трубку допустимых траекторий заданного типа $L(x, p)$.

Из структуры операции построения результирующего ИМ видно, что для достоверной (совместной) выборки замеров уменьшение размеров ИМ будет тем лучше, чем больше разброс замеров, например, при сильном их зашумлении, даже при малой длине выборки. В указанных построениях не используются какие-либо вероятностные характеристики ошибки замера и не применяется аппарат доверительных вероятностей и доверительных интервалов. Результат получается в виде множества допустимых значений параметров аппроксимирующей кривой (ИМ) и соответствующей трубки допустимых траекторий измеряемого процесса. Отбрасывание недостоверного замера решается на основе анализа пустоты пересечения его парциальных ИМ с совокупностью парциальных множеств остальных замеров выборки.

Технически рассматриваемый подход к оцениванию и аппроксимации заключается в расчете парциальных информационных множеств, выполнении алгебраических операций пересечения множеств в пространстве параметров аппроксимирующей функции, конструктивном описании результирующего ИМ и расчете трубки допустимых кривых. Соответствующие алгоритмы были реализованы в быстрых вычислительных программах оценивания параметров аппроксимирующих функций указанных выше типов (степенная, линейная функция и полуквадратическая парабола).

4. Результаты аппроксимации

Предварительная обработка исходного массива данных (см. рис.1,а) включала исключение экстремальных замеров (обусловленных нестабильностями экспериментов) и объединение замеров с одинаковыми значениями аргумента в единый замер со своей областью неопределенности. “Очищенный” массив разбивался на три подмассива данных, соответствующих указанным последовательным участкам значения КСУ.

Результаты расчетов приведены на рис.3. Здесь знаком “крест” отмечены замеры, вошедшие в массив после предварительной обработки, знаком “кружок” отмечены экстремальные замеры из первичного массива. Полосками отмечены полученные области допустимых значений аппроксимирующих кривых (трубки) на каждом из участков значения аргумента КСУ. Отметим, что примененный метод аппроксимации прямо позволяет выделять трубку аппроксимируемой зависимости K_{IC} от КСУ, площадь которой значительно меньше площади первоначальной трубки рассеяния замеров (на начальном участке в 65, на среднем участке в 3, на правом участке в 5 раз). Видно также, что прямая линия (полученная линейной аппроксимацией МНК на всем интервале КСУ для “очищенного” массива данных) находится вне уточненной трубки практически на всех участках, то есть дает неприемлемо грубую аппроксимацию и не может использоваться в качестве расчетной зависимости.

На левом участке КСУ $[0,5 - 1,8]$ кгс·м/см² аппроксимация функцией вида $K_{IC} = A \cdot (КСУ)^\alpha + C$ дала допустимую область значений коэффициентов A и α с тремя вершинами (4,201; 1,816), (4,152; 1,824), (4,282; 1,795) и среднее значение условной постоянной составляющей $C=106,0$ кгс/мм^{3/2}. Для моделирования можно использовать средние значения коэффициентов $A=4,22$ кгс/мм^{3/2}, $\alpha=1,81$ (безразмерный) и указанное C . При этом расчетная зависимость принимает вид $K_{IC} = 4,22 \cdot (КСУ / 0,5)^{1,81} + 106,0$ (нормирующий множитель 0,5 имеет размерность ударной вязкости).

На среднем участке КСУ $[1,8 - 3,5]$ кгс·м/см² аппроксимация прямой вида $K_{IC} = A \cdot КСУ + C$ дала допустимую область значений коэффициентов A и C с пятью вершинами (25,833; 155,001), (27,777; 152,666), (32,122; 143,543), (29,629; 144,665) и (23,887; 155,001). Для моделирования можно использовать средние значения коэффициентов $A=28,0$ с условной размерностью [кгс/мм^{3/2}/(кгс·м/см²)] и $C=149,3$ кгс/мм^{3/2}. При этом расчетная зависимость принимает вид $K_{IC} = 28,0 \cdot (КСУ - 1,8) + 149,3$ (здесь центрирующий коэффициент 1,8 имеет размерность КСУ).

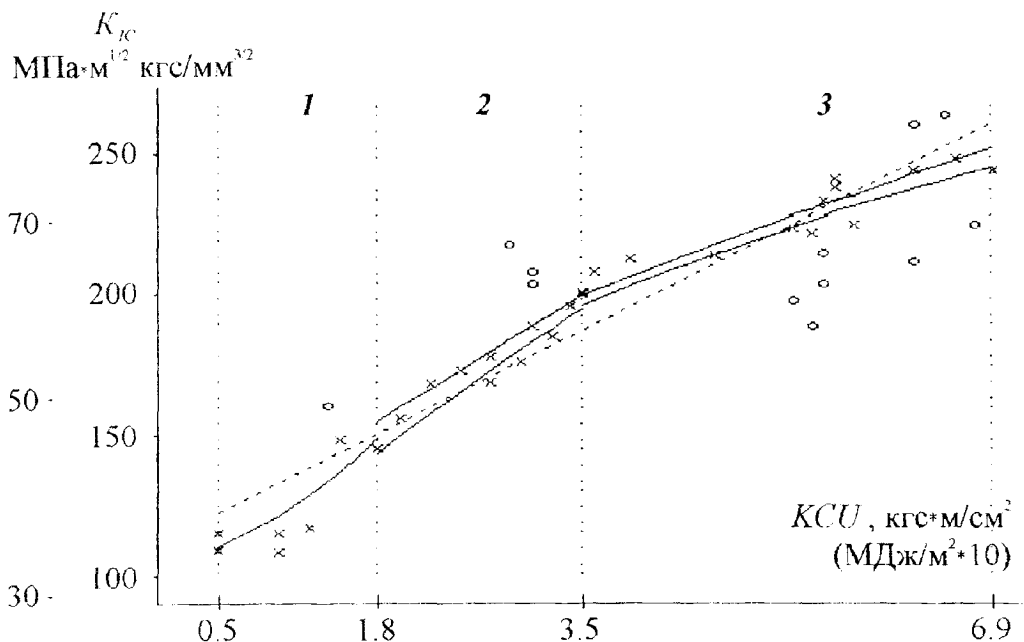


Рис.3. Результаты аппроксимации

На правом участке $KCU [3,5-6,9] \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ аппроксимация функцией вида $K_{IC} = A \cdot (KCU)^{0,5} + C$ дала допустимую область значений коэффициентов A и C с четырьмя вершинами $(67,211; 195,0)$, $(73,918; 193,008)$, $(66,089; 191,748)$ и $(60,320; 195,0)$. Для моделирования можно использовать средние значения коэффициентов $A = 67,12$ с условной размерностью $[\text{кгс}/\text{мм}^{3/2}/(\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2)]$ и $C = 193,03 \text{ кгс}/\text{мм}^{3/2}$. При этом расчетная зависимость принимает вид $K_{IC} = 67,12 \cdot (KCU)^{0,5} - 3,25^{0,5} + 193,03$ (здесь центрирующий коэффициент $3,25$ имеет размерность KCU).

Из приведенных расчетных зависимостей составлялась единая модельная зависимость, позволяющая прогнозировать параметры трещиностойкости изученных сталей на всем интервале значений ударной вязкости. Проверка показывает, что указанные парциальные кривые хорошо стыкуются на смежных границах участков, с относительной ошибкой порядка $0,2-0,3\%$.

5. Выводы

1. Использование минимаксного метода аппроксимации экспериментальных данных, полученных в условиях повышенного разброса замеров и неопределенности характеристик их ошибок, позволяет более тонко анализировать зависимость между параметрами трещиностойкости и ударной вязкости мартенситно-старееющих сталей на Fe-Cr-Ni-основе.

2. Показано, что наблюдаемое изменение характера зависимости K_{IC} от KCU в определенных областях значений KCU связано с особенностями процесса разрушения данных материалов и, в частности, с изменением доминирующего механизма роста трещины.

3. Получены уточненные модельные расчетные зависимости $K_{IC} = f(KCU)$, позволяющие в широком диапазоне значений KCU обоснованно прогнозировать трещиностойкость группы МСС типа Х11Н9М2 по данным простых испытаний на ударную вязкость.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта РФФИ 97-01-00458.

Библиографический список

1. Кузнецов В.Д. Физика твёрдого тела. т.V. Материалы по физике пластичности и хрупкости металлов. - Томск: Полиграфиздат, 1949. - 669 с.
2. Романов О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. - М.: Металлургия, 1979. - 176 с.
3. Иванова В.С. Прочность и разрушение металлических материалов. - М.: Наука, 1992. - 160 с.
4. Яновец И. Сопротивление сварных соединений коррозионно-стойкой аустенито-мартенситной стали ОЗХ10Н10М2Т хрупкому разрушению// Проблемы прочности. - 1993. - №4. - С. 20-28.
5. Diwakar V. et.al. Fracture toughness of maraging steel from Charpy «V» notch specimens // Journal of Material Science, 1989, 24,pp. 3994-3999.
6. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. - М.: Наука, 1977. - 382 с.
7. Kumkov S.I., Patsko V.S. Control of Informational Sets in a Pursuit Problem. Annals of the International Society of Dynamic Games, New Trends in Dynamic Games and Applications. Editor G.J.Olsder. 1995, pp191-206. Birkhauser Boston Inc., Boston, USA.