

6
A 55

ОРДЕНА ЛЕНИНА
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

КОВПАК Владимир Иванович

МЕТОДЫ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ
ЖАРОПРОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА БОЛЬШИЕ СРОКИ СЛУЖБЫ

01.02.03. Сопротивление материалов
и строительная механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Киев-1973

ОРДЕНА ЛЕНИНА
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

КОВПАК Владимир Иванович

На правах рукописи

МЕТОДЫ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ
НАРОПРОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА БОЛЬШИЕ СРОКИ СЛУЖБЫ

01.02.03

Сопротивление материалов
и строительная механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Киев-1973

А 55

Работа выполнена в Институте проблем прочности
АН Украинской ССР

Научный консультант - академик АН УССР, доктор технических наук, профессор Г.С. ПИСАРЕНКО.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН УССР,
доктор технических наук

Г. А. ИОВЧАН

Доктор физико-математических наук

О. В. СОСНИН

Доктор технических наук

А. А. ЛЕБЕДЕВ

Ведущее предприятие - ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ КОТЛОТУРБИННЫЙ ИНСТИТУТ имени И.И.
ПОЛЗУНОВА.

Автореферат разослан "18" сентября 1973 г.

Защита диссертации состоится "30" октября 1973 г.

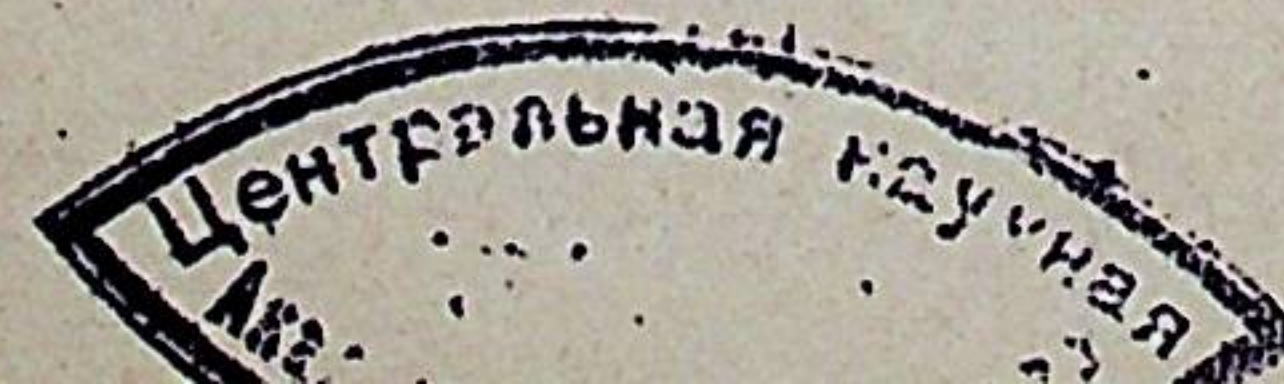
в 14 часов на заседании Учёного совета ордена Трудового
Красного Знамени Института проблем материаловедения АН УССР,
г. Киев-142, ул. Кржижановского, 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный гербо-
вой печатью, просим направить по адресу:
252142, г. Киев-142, ул. Кржижановского, 3, Институт проблем
материаловедения АН УССР.

Учёный секретарь Совета,
кандидат технических наук

Л. Ф. КОЛЕСНИЧЕНКО



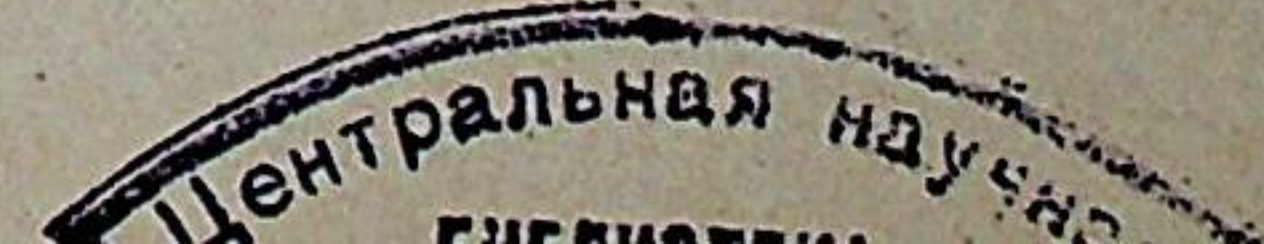
Повышение рабочих параметров энергетических машин с боль-
шими сроками службы /50-200 тысяч часов/ предъявляет высокие
требования к создаваемым новым жаропрочным материалам, способ-
ным в условиях эксплуатации сохранять относительно неизменными
свои физико-химические особенности, структурное состояние и
связанные с ними прочностные свойства, определяющие возможность
сопротивляться длительному деформированию и разрушению при вы-
сокотемпературном нагружении.

Развитие теории жаропрочности направлено на углубление
знаний о межатомном взаимодействии и роли несовершенств кристал-
лической решетки в металлах, о взаимодействии атомов примесей
с этими несовершенствами, о механизмах пластического деформиро-
вания и разрушения, о закономерностях изменения физико-механи-
ческих свойств жаропрочных металлов при изменении их химическо-
го состава и структурного состояния, вызываемых длительным
высокотемпературным нагружением.

Теория жаропрочности новых материалов развивается от част-
ного к общему, т.е. от изучения отдельных физических явлений
путем эксперимента к обобщениям, позволяющим создавать новые
материалы. С учетом выявленных общих закономерностей новые
материалы все еще подбираются опытным путем.

В настоящее время еще не разработаны методы, с помощью
которых возможно было бы рассчитать новый жаропрочный материал
на заданный срок службы в конкретных условиях эксплуатации.

Разработка методов прогнозирования характеристик длитель-
ной прочности и ползучести на основании результатов испытаний
ограниченной продолжительности ведется так же путем подбора
аналитических уравнений или графо-аналитических способов; удов-
летворительно описывающих экспериментальные данные. Однако,
подобранные таким способом эмпирические зависимости времени
до разрушения от напряжения при постоянной температуре, далеко
не всегда могут быть использованы для экстраполяции резуль-
татов испытаний на большие сроки службы /100 - 200 тысяч часов/
не только для материалов другого класса, но и тех, для которых
они выведены. Это объясняется тем, что результаты испытаний
ограниченной продолжительности при одном уровне температуры не



содержат в себе информации о том, как будет вести себя материал в дальнейшем, при изменении преобладающего влияния на процессы повреждения механизмов деформирования и разрушения.

Разработанные в реферируемой работе методы прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести основаны на температурно-временном подобии развития процессов повреждения в материале при длительном нагружении.

Закономерности изменения структурного состояния и способности материала сопротивляться длительному разрушению при температуре, для которой необходимо осуществить прогнозирование на заданную длительность, возможно установить на основании результатов испытаний при более высокой температуре и значительно меньшей продолжительности испытаний.

В основу предлагаемого метода принята одна из основных гипотез теории жаропрочности о том, что при более высоких температурах одни и те же внутренние процессы в материале при сохранении одинаковой последовательности протекают с более высокими скоростями.

Полный цикл структурных изменений в материале за срок его службы при заданной температуре можно изучить на основании результатов испытаний меньшей продолжительности при более высокой температуре.

Из теории жаропрочности известно, что одни и те же физико-химические процессы, приводящие к одинаковым структурным изменениям в материале, обуславливающим его сопротивление длительному деформированию и разрушению, могут протекать в узких температурных интервалах.

Для жаропрочных сталей такие интервалы ограничиваются 100-150 градусами /например - в области температур от 400 до 550°C и т.д./, для жаропрочных сплавов на кобальтовой, никелевой, хромоникелевой основах, а также для улучшения сталей аустенитного класса область температур, в которой могут протекать одинаковые внутренние процессы в материале составляет 200 - 250°C /например, - в интервале от 700 до 950°C и т.д./, для тугоплавких металлов и сплавов эти области значительно шире.

Принято также предположение о том, что следствием единообразия внутренних процессов, протекающих в материале при длительном нагружении в узком температурном интервале, является подобие графических зависимостей между напряжением и временем до разрушения в той же области температур.

Подобие первичных кривых ползучести может существовать в области напряжений, определяемой преобладающим влиянием одного механизма деформирования и разрушения при данной температуре.

В области температур с одинаковыми внутренними изменениями в материале подобие первичных кривых ползучести существует при значениях напряжений, вызывающих эквивалентное повреждение материала при разных температурах и продолжительностях испытаний.

Существование корреляционных связей между характеристиками длительной прочности и ползучести при эквивалентном повреждении материала длительным нагружением в области температур, определяемой одинаковым характером структурных изменений, является также одной из основных гипотез предлагаемого метода.

Следовательно, для решения задач прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести предлагаемым температурно-временным методом необходимо располагать результатами испытаний при нескольких уровнях температур, а как минимум - при двух более высоких по отношению к той, для которой необходимо осуществить экстраполирование.

Экстраполирование и пересчеты на другие уровни температур характеристик длительной прочности и ползучести проводится на основании графических обобщенных диаграмм длительной прочности, которые строятся для исследованного температурного интервала на основании сформулированных в реферируемой работе уравнений состояния эквивалентного повреждения материала и устанавливаемых на основании экспериментальных данных условий подобия между коррелирующими характеристиками жаропрочности.

Разработка методов, позволяющих получать достоверные значения прогнозируемых характеристик длительной прочности и ползучести на основании результатов испытаний ограниченной продолжительности в области температур, в которых возможно протекание одинаковых внутренних процессов в материале и их обоснование с позиций принятых исходных предпосылок потребовала решения следующих задач:

1. Доказать возможность существования состояния эквивалентного повреждения материала при разных уровнях температур, напряжений и продолжительностей испытаний /меньших для более высоких уровней температур/.

2. Сформулировать уравнение состояния эквивалентного повреждения материала при испытаниях на длительную прочность в температурных интервалах, определяемых единообразием и одинаковой последовательностью внутренних процессов.

3. Сформулировать уравнения состояния эквивалентного повреждения при испытаниях на ползучесть для одного и нескольких уровней температур.

4. Разработать способы решений уравнений состояния эквивалентного повреждения /пункты 2 и 3/.

5. Показать преимущества предлагаемых методов прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести по сравнению с известными методами.

При решении поставленных задач использовались как результаты собственных исследований, так и литературные данные по испытаниям большой продолжительности /до 100000 часов/, полученные как в СССР, так и в США, ФРГ, Чехословакия, Японии и др.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 263 страниц основного текста, 210 рисунков, 59 таблиц, вынесенных в "Приложения". Список литературы включает 183 наименования работ отечественных и зарубежных исследователей.

Глава I. ОСОБЕННОСТИ ДЛИТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ.

На основании анализа исследований, выполненных в СССР и за рубежом по теории жаропрочности металлических материалов, отмечается, что длительное деформирование и разрушение жаропрочных сталей и сплавов на основе твердых растворов является следствием протекания в материале сложных физико-химических процессов, перемещения дислокаций, развития микро- и макротрещин, зарождения и роста пор по границам зерен, подвижных, диффузионных, окислительных и других процессов.

Вследствие недостаточной изученности закономерностей протекания в материале большой совокупности известных и еще не известных процессов во времени, не представляется возможным построить строгую, физически обоснованную теорию ползучести и длительного разрушения, приемлемую для решения практических задач описания характеристик длительной прочности и ползучести во времени.

Известные эмпирические зависимости длительной прочности, связывающие время до разрушения с напряжением, построены на учете одного механизма деформирования в то время как в материале может одновременно действовать несколько механизмов.

В связи с этим степенная $\tau = B\sigma^{-m}$ /, экспоненциальная $\tau = Ae^{-\sigma}$ / и более сложные по форме $\tau = c\sigma^n e^{-\alpha\sigma}$ / зависимости времени до разрушения от напряжения, разработанные для описания результатов испытаний при одном уровне температуры, могут применяться лишь для интерполирования характеристик длительной прочности, поскольку постоянные коэффициенты этих уравнений $A, B, C, \alpha, \delta, m, n$ / зависят не только от температуры, но и от напряжения. При больших продолжительностях испытаний /малые уровни напряжений/ значения указанных коэффициентов должны быть другими, а ранее рассмотренные результаты испытаний, на основании которых установлены их осредненные значения, не содержат информации, на основании которой можно определить их новые значения. Это ведет к необходимости увеличивать продолжительность эксперимента при одном уровне температуры.

Вопросы прогнозирования характеристик длительной прочности в настоящее время могут решаться на основании результатов испытаний при нескольких уровнях температур с учетом того, что в этом температурном интервале в условиях длительного нагружения процессы повреждения контролируются одними и теми же механизмами.

Поскольку невозможно учесть в аналитических уравнениях длительной прочности все многообразие протекающих на атомных уровнях процессов на основании тех сведений, которые в настоящее время могут быть обобщены, то их следует исключить из рассмотрения, сравнивая материал в эквивалентных условиях повреждения, т.е. в условиях, при которых все эти процессы при разных уровнях температур и напряжений за разное время приводят

материал к качественно одинаковому структурному состоянию. Только в таком случае можно предполагать о существовании корреляционных связей между характеристиками жаропрочности при разных уровнях температур.

Большие погрешности, имеющие место при прогнозировании характеристик длительной прочности с помощью известных температурно-временных уравнений, возникают вследствие того, что при этом не учитываются температурные интервалы, в которых процессы повреждения материала контролируются одними и теми же внутренними механизмами.

На ряде примеров по результатам испытаний на длительную прочность в широком интервале температур показано, что при одинаковой разнице в температуре /например, через 50° / только по внешнему виду и взаимному расположению на графике кривых длительной прочности можно ориентировочно выделить температурные интервалы, в которых можно предполагать одинаковый характер процессов повреждения материала.

На примере жаропрочной стали IX17MBФБР показано, что в интервале температур $565 - 700^{\circ}\text{C}$ существует два диапазона, в которых процессы повреждения должны рассматриваться с разных позиций.

При температурах $565 - 600^{\circ}\text{C}$ процессы повреждения контролируются одними механизмами, а при температурах выше 600°C - другими. Геометрически это проявляется в том, что кривые длительной прочности для температур 650 и 700°C резко изменили угол наклона к оси абсцисс по отношению к кривым для температур $565 - 600^{\circ}\text{C}$. С точки зрения внутренних процессов, протекающих в материалах, содержащих в качестве легирующего элемента до 12% хрома, известно, что при температурах выше 600°C ускоряются процессы диффузии и происходит их резкое разупрочнение.

Аналогичный вид при одинаковой разнице в температуре имеют кривые длительной прочности аустенитной стали X25Ni6Cr7Al и ряда других материалов, приведенных в качестве примеров в диссертационной работе.

Анализ зависимостей относительного удлинения /сужения/ от температуры в сопоставлении с отмеченными выше особенностями кривых длительной прочности позволяли предположить, что в каче-

стве ориентировочного критерия оценки ширины температурного интервала могут быть приняты температурные зависимости относительного удлинения /сужения/ при кратковременных испытаниях.

Область температур, в которой значения относительной деформации с изменением температуры испытаний монотонно возрастают, понижаются или остаются постоянными, может быть принята за интервал температур с предполагаемо одинаковым характером внутренних изменений в материале при длительных испытаниях.

Основанием для такого предположения являются исследования по установлению зависимостей между деформацией после разрушения при длительных испытаниях от температуры и времени, выполненные Гленом на широком классе жаропрочных металлов, а также зависимости деформации после разрушения от скорости деформирования и температуры, установленные А.В.Станюковичем также для широкого класса материалов.

Указанные зависимости однотипны с зависимостями относительного удлинения от температуры при кратковременных испытаниях. При этом минимальные или максимальные значения деформаций для более высоких уровней температур достигаются за меньшие продолжительности испытаний.

Этот экспериментально установленный факт может служить качественным подтверждением того, что при более высоких температурах процессы повреждения материала при длительном нагружении протекают с более высокими скоростями.

К другим, подтверждающим эту гипотезу, экспериментально установленным фактам, следует отнести изменения характера разрушения при длительном высокотемпературном нагружении.

На примере исследований перлитных жаропрочных сталей, проведенных Т.Прика и В.Фолдина /Чехословакия/ установлено существование трех типов разрушения в зависимости от продолжительности испытаний при каждом из исследованных уровней температур.

Переход от одного вида разрушения к другому авторы связали с переломами в графических зависимостях времени до разрушения от напряжения для каждого из исследованных уровней температур, а результаты испытаний аппроксимировала прямыми отрезками, как показано на рис. 1.

Из рисунка видно, что переломы, а следовательно и изменения видов разрушения при более высоких температурах наступают при меньших продолжительностях испытаний.

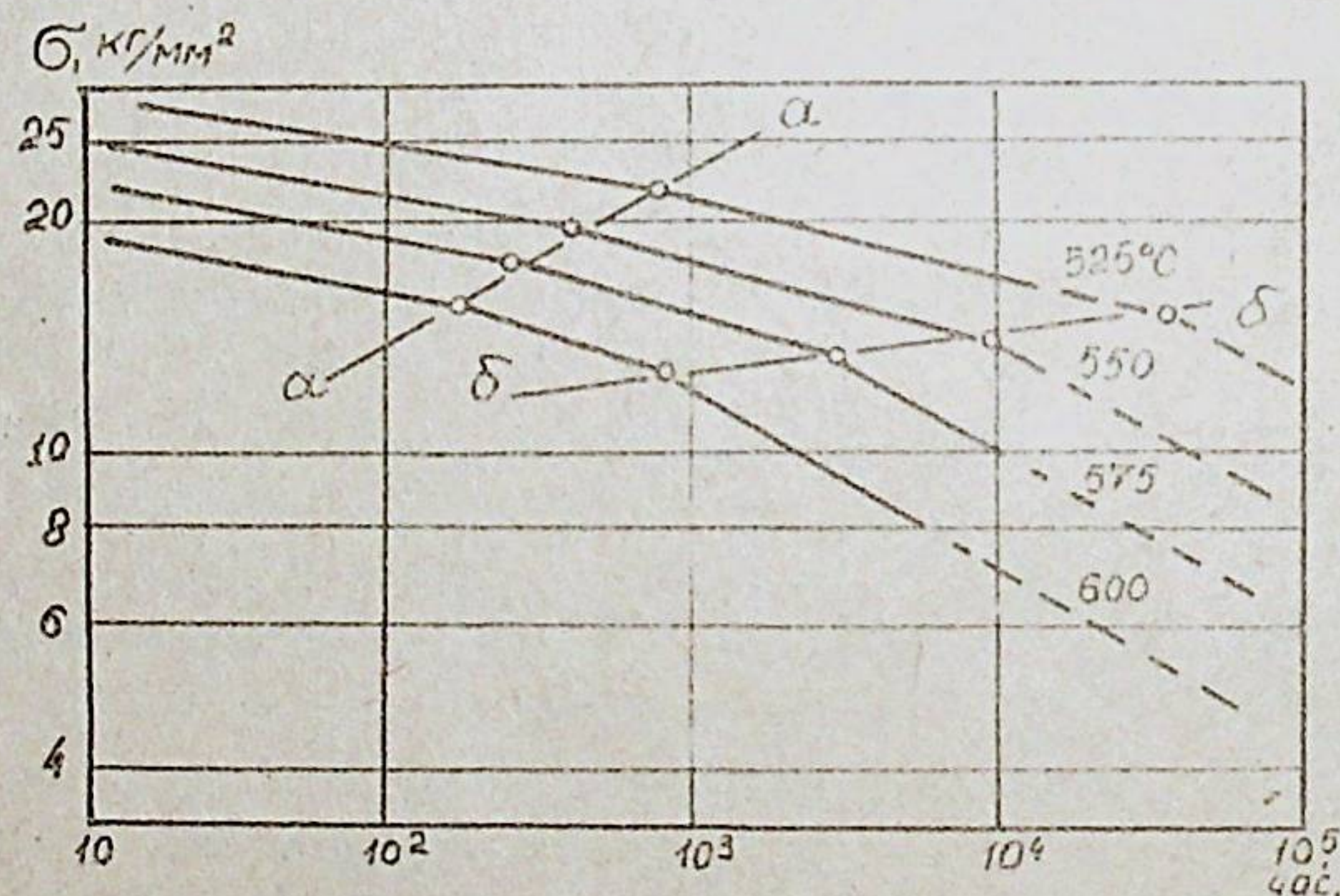


Рис. I Диаграммы длительной прочности перлитной стали.

Область напряжений и соответствующих им длительностей до разрушения, ограниченная на рис. I секущей а - а относится к внутризеренному разрушению; область между секущими а - а и б - б - к межзеренному разрушению вследствие развития клиновидных трещин на стыках трех зерен; область после секущей б - б относится к межзеренному разрушению вследствие образования и развития пор по границам зерен.

Известно, что разрушения двух видов, а кроме того и смешанное, имеют место в некоторой области напряжений с протяженностью во времени. Таким образом, приведенные на рис. I результаты испытаний должны аппроксимироваться в логарифмических координатах кривыми с немонотонной кривизной. Максимумы кривизны соответствуют переходным областям от преобладающего влияния одного механизма деформирования и разрушения к другому.

Секущие а - а и б - б могут быть проведены с большей относительной свободой, чем это показано на рисунке, тем не менее в точках пересечения с кривыми длительной прочности они попадут в области одинакового структурного состояния материала, определяющего один и тот же вид разрушения при разных уровнях температур, за разное время; меньшее для более высоких температур.

Предлагаемый метод описания и прогнозирования характеристик длительной прочности предполагает существование корреляционных связей между значениями напряжений, определяемыми точками пересечения кривых длительной прочности /рис. I/ секущими а - а, б - б и т.д. Такие значения напряжений при разных уровнях температур являются сопоставимыми с точки зрения эквивалентного повреждения, приводящего материал к одинаковому виду разрушения в исследуемом интервале температур.

Поскольку повреждение материала начинается с момента его нагрева и нагружения, т.е. с начала испытаний, то точкой пересечения секущей а - а с ординатой, соответствующей началу эксперимента, определится положение полюса для других секущих в этой области (в дальнейшем - лучей эквивалентного повреждения), определяющих на кривых длительной прочности значения напряжений, вызывающих разрушение вследствие эквивалентного повреждения материала при разных уровнях температур за разное время. Для других областей напряжений и продолжительностей испытаний /между секущими а - а и б - б, за секущей б - б положение полюса лучей эквивалентного повреждения материала, в общем случае, не совпадает с определенным для первой области /до секущей б - б/.

При применении для прогнозирования ранее названных степенной, экспоненциальной или комбинированной из них зависимостей между временем до разрушения и напряжением, необходимо определять значения постоянных коэффициентов для них в каждой названной области напряжений и соответствующих им длительностей до разрушения.

Предлагаемый в реферируемой работе метод позволяет устанавливать изменяющиеся условия подобия между сопоставимыми с точки зрения эквивалентного повреждения значениями напряжений на основании результатов испытаний при более высоких уровнях температур и проводить экстраполирование при пониженных темпе-

ратурах на значительно большие длительности, что отчетливо видно из рис. I по секущим а - а и б - б.

Известные температурно-временные, в том числе и параметрические зависимости длительной прочности, связывающие время до разрушения с напряжением и температурой определенными условиями, могут успешно применяться для описания и прогнозирования характеристик длительной прочности, когда экспериментальные данные в исследуемом интервале температур действительно соответствуют условию, положенному в основу того или иного уравнения.

Обладая общностью исходных предпосылок и методических особенностей при решении задач длительной прочности, параметрические методы имеют принципиальное различие в условиях подобия, на основании которых они могут быть отнесены к трем различным классам /такая классификация параметрических методов проводится, по-видимому, впервые/.

В известных зависимостях типа Ларсона-Миллера заложено следующее условие температурно-временного подобия

$$\Delta \lg \tau(T_1, T_2) = \alpha P(\sigma) \quad /1/$$

$$\alpha = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \text{const}; \quad T_2 > T_1$$

Для двух уровней температур T_1 и T_2 при постоянном значении параметра $P(\sigma)$ /что то же - напряжения/ приращение логарифма длительности до разрушения $\Delta \lg \tau$ прямо пропорционально значению параметра $P(\sigma)$.

Поскольку с уменьшением напряжения значение параметра $P(\sigma)$ возрастает, то возрастает и значение $\Delta \lg \tau$. Геометрически это означает, что расстояние по горизонтали между диаграммами длительной прочности увеличивается.

Уравнение типа Менсона основано на более сложном условии подобия в связи с тем, что значение параметра R является функцией не только напряжения, но и температуры.

$$\Delta \lg \tau(T_1, T_2) = [R(\sigma, T_1)(T_1 - b)^c - R(\sigma, T_2)(T_2 - b)^c] \cdot \sigma^d \quad /2/$$

Это условие так же, как и условие /1/ пригодно для расходящихся кривых длительной прочности, но с другими углами расхождения.

В уравнениях типа Дорна, Мурри, Шерби, Клауса и др. приращение логарифма длительности до разрушения не зависит от напряжения. Для них условие подобия осуществляется по уравнению

$$\Delta \lg \tau(T_1, T_2) = \chi \cdot t; \quad t = \text{const}; \quad /3/$$

$$\chi = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \text{const}.$$

Геометрически это означает, что такого вида зависимости применимы для решения задач другого типа, т.е. для случаев, когда кривые длительной прочности эквидистантны.

Совершенствование уравнения Дорна, предложенное А.В.Станюковичем и В.К.Адамовичем, заключающееся в том, что коэффициент t принят зависящим от напряжения и введена поправка на "расслоение" обобщенной параметрической кривой, привела к тому, что модернизированное уравнение стало более гибким и позволяет решать задачи между условиями /1/ и /3/.

Температурно-временные зависимости длительной прочности, предложенные Б.Я.Пинесом, Я.Е.Регузиным и И.И.Труниным, несмотря на различие в исходных предпосылках, количестве постоянных и их физического смысла, имеют одинаковое условие подобия.

$$\Delta \lg \tau(T_1, T_2) = \alpha - \beta \sigma; \quad /4/$$

$$\alpha = \text{const}; \quad \beta = \text{const}.$$

Условие подобия /4/ так же как и условия /1/ и /2/ предполагает возможность решения задач длительной прочности для расходящихся кривых в логарифмических координатах.

Таким образом, параметрические методы и температурно-временные уравнения длительной прочности могут применяться для решения задач определенного класса, когда закономерности изменения сопротивляемости длительному разрушению во времени в исследуемом температурном интервале соответствуют предпосылкам, заложенным в то или иное уравнение.

Проведенный в реферируемой работе анализ возможностей решения задач прогнозирования с применением параметрических методов показал, что в зависимости от класса материала /жаропрочные сталь и сплав, тугоплавкие металлы и сплавы на их основе/ разница в температуре, при которой можно получать достоверные прогнозируемые характеристики жаропрочности, может колебаться от десятков до сотен градусов.

Этот вывод справедлив для материалов, в которых при длительном нагружении не происходит существенных структурных изменений, приводящих к изменениям механизмов деформирования, обуславливающих изменение вида разрушения /см. рис.1/.

При разработке предлагаемого метода прогнозирования характеристик длительной прочности ставилась задача возможного учета общих закономерностей сопротивления разрушению каждого конкретного материала в исследуемом интервале температур с исключением особенностей, свойственных собственному методу, как это показано на примере известных температурно-временных и параметрических методов.

Характеристики длительной прочности и ползучести наиболее чувствительны к внутренним изменениям в материале, происходящим при длительном высокотемпературном нагружении и находящим свое отражение на характере кривых длительной прочности, независимо от того, в каких координатах они аппроксимированы.

Каковы же в связи с этим особенности графических зависимостей между напряжением, временем до разрушения и температурой в логарифмических координатах?

Предпочтительный выбор логарифмической системы координат основан на том, что она получила наибольшее распространение при обобщении экспериментальных данных. В реферируемой работе приводятся примеры решения задач прогнозирования характеристик длительной прочности, исходя из тех же исходных предположений, применительно и к полул로그арифмической системе координат. Проведено сопоставление прогнозируемых характеристик для одного материала в обеих системах координат.

Проведенный анализ большого количества экспериментальных кривых длительной прочности в логарифмической системе координат при продолжительностях испытаний до 100000 часов позволял

сделать следующие обобщения:

1. Большинство графических зависимостей между напряжением и временем до разрушения для жаропрочных сталей и сплавов на основе твердых растворов при базе испытаний до 100000 часов имеют криволинейный характер.

2. Независимо от характера зависимости времени до разрушения от напряжения /прямолинейная, криволинейная монотонная или немонотонная/, в логарифмических координатах в широком интервале температур они аппроксимируются расходящимися линиями.

3. Кривизна графических зависимостей между напряжением и временем до разрушения увеличивается с увеличением температуры испытаний.

4. При немонотонной кривизне графических зависимостей между напряжением и временем до разрушения максимум кривизны сдвигается в направлении больших длительностей с понижением температуры испытаний.

5. При приближенной аппроксимации результатов испытаний на длительную прочность прямолинейными отрезками с переломами, последние при более высоких уровнях температур сдвигаются в направлении меньших длительностей.

6. Встречающиеся в литературе сходящиеся в логарифмических координатах кривые длительной прочности для разных уровней температур при одном виде нагружения следует отнести к ошибочным, построенным на основании некорректного эксперимента.

7. Имеют место случаи, когда графические зависимости времени до разрушения от напряжения для разных уровней температур как прямолинейного, так и криволинейного характера располагаются на графиках эквидистантно друг другу.

В соответствии с характером графических зависимостей времени до разрушения от напряжения и их взаимного расположения на графике для исследуемых уровней температур необходимо выбирать тот или иной метод прогнозирования, отражающий особенности материала сопротивляться длительному разрушению в этом температурном интервале.

Из проведенного анализа геометрических особенностей кривых длительной прочности видно, что их характер при больших длительностях испытаний в широком интервале температур находится в хорошем соответствии с ранее сформулированными гипотезами, предполагающими закономерность протекания внутренних процессов в материале при длительном нагружении /за исключением позиций 6 и 7/.

Таким образом, предлагаемый метод прогнозирования характеристик длительной прочности может быть использован для исследования тех жаропрочных материалов, которые по своим внутренним особенностям сопротивляться длительному разрушению приводят к графическим зависимостям между напряжением, временем и температурой, перечисленным позициями I + 5.

Глава II. НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПОВРЕЖДА-
ЕМОСТЬ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР -
- ОСНОВНАЯ ГИПОТЕЗА НОВОГО МЕТОДА.

На основании проведенного анализа геометрических особенностей диаграмм длительной прочности и зависимостей пластической деформации от температуры в I-й главе было показано, что эквивалентное состояние повреждения материала в процессе длительного нагружения для температурного интервала, в котором возможен одинаковый характер структурных изменений, определяющих его работоспособность, характеризуется значениями напряжений и соответствующих им длительностей до разрушения, располагающихся в точках пересечения кривых длительной прочности криволинейными лучами из одного полюса как показано на рис. 2.

Физический смысл полюса P_0 ; в этом случае, определяет условия, в которых повреждение отсутствует /материал в состоянии расплава/. Ввиду сложности и недостаточной изученности процессов повреждения, такие кривые в настоящее время еще не могут быть описаны аналитически.

Основываясь на установленном теорией жаропрочности факте о том, что одинаковые структурные изменения в материале в процессе длительного нагружения могут происходить только в ограниченных температурных интервалах, то необходимо разработать способы определения границ этих интервалов, не прибегая к сложным металлографическим исследованиям.

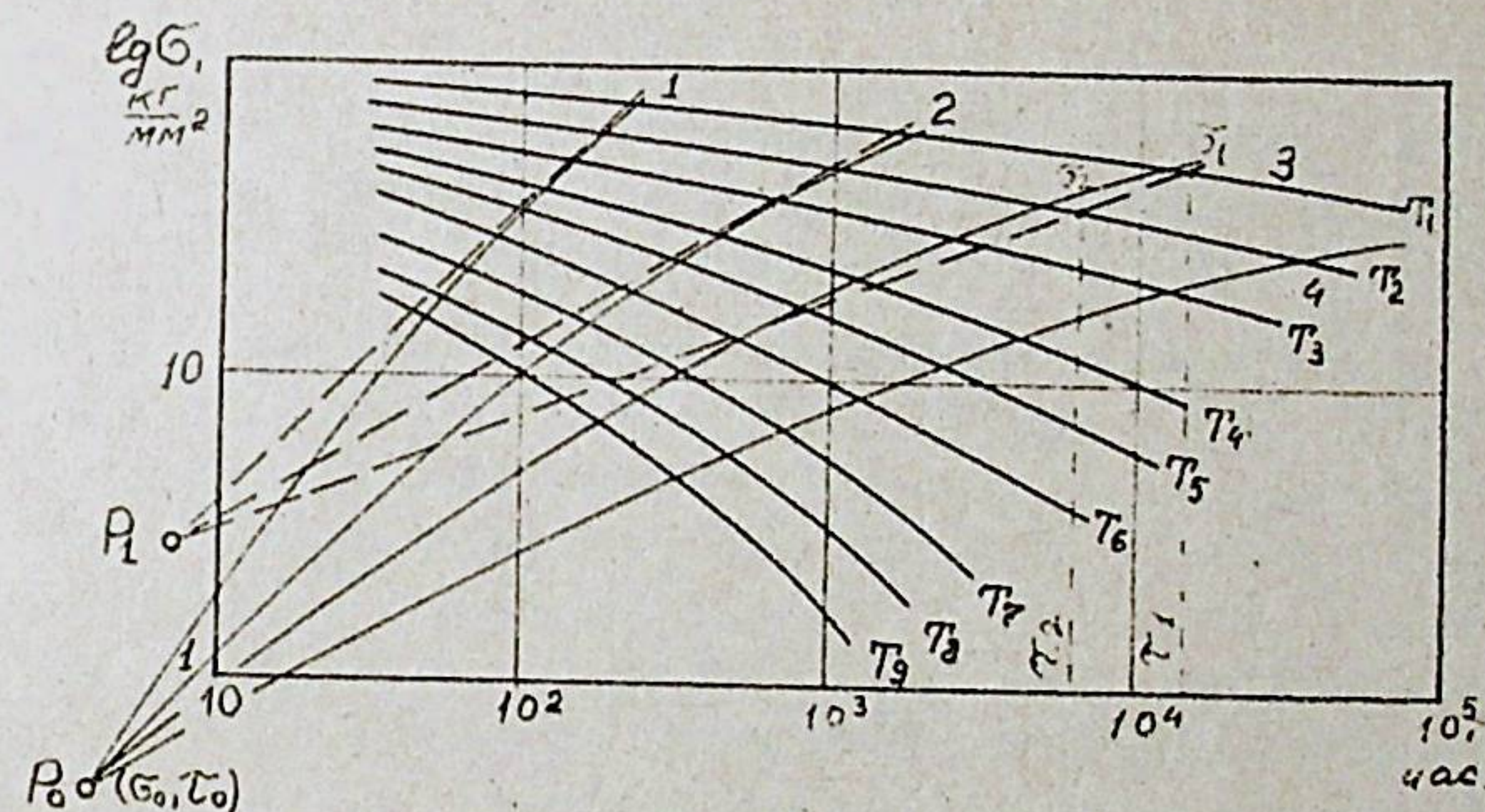


Рис. 2 Схема определения состояния эквивалентного повреждения материала при испытаниях на длительную прочность.

Предположем, что нам известно какие механизмы определяют повреждаемость материала в интервале температур $T_1 - T_3$.

В узком температурном интервале кривые эквивалентного повреждения с достаточным приближением при решении практических задач, могут быть заменены прямолинейными лучами, как показано на рис. 2 пунктиром, сходящимися в полюсе P_I .

Приемлемость такого приближения в дальнейшем доказывается на конкретных примерах решения задач прогнозирования характеристик длительной прочности в сравнении с экспериментом.

Значения напряжений в точках пересечения кривых лучами / σ_1 и σ_2 на рис. 2/ будут сопоставимы с точки зрения эквивалентного повреждения /в каждом сечении отдельно/. Между значениями напряжений в данном температурном интервале существует корреляционная связь, определяемая условием подобия, действительным в пределах превалирующего влияния одного механизма деформирования и разрушения.

Выполненные в СССР и за рубежом металлографические исследования жаропрочных металлов, выдержанных длительное время при

высоких температурах как в ненагруженном, так и в нагруженном состояниях, позволяют предполагать правомерность принятых в реферируемой работе основных предпосылок.

Приведенными в реферируемой работе примерами подтверждается гипотеза о том, что при более высоких температурах одни и те же структурные изменения в материале происходят за меньшее время испытаний. В указанных работах отмечается также, что количество и размеры образующихся вторичных фаз в процессе длительных выдержек при высокой температуре без нагрузки /старение/ или в нагруженном состоянии /длительная прочность, ползучесть/ примерно одинаковы в интервале температур с разницей между минимальной и максимальной для сталей до 150°C , сплавов на никелевой основе - до 250°C и разницей во времени, превышающей один порядок.

Отсутствие точных количественных характеристик в металлографических исследованиях объясняется недостаточной разрешающей способностью оборудования и приборов, а также методическими трудностями вычислений. Однако приведенная качественная картина закономерностей процессов старения жаропрочных металлов дала возможность предположить существование состояния эквивалентного повреждения материала, достигаемого при длительном высокотемпературном нагружении в широком интервале температур за разное время. Эквивалентное состояние повреждения материала в процессе испытаний на длительную прочность при более высоких температурах достигается при меньших уровнях напряжений и за меньшее время испытаний по сравнению с испытаниями при меньших уровнях температур.

Количественная оценка состояния эквивалентного повреждения материала может быть достоверно проведена при сопоставлении характеристик длительной прочности и ползучести, как наиболее чувствительных к структурным изменениям.

На рис. 3 приведена схема экспериментальной проверки состояния эквивалентного повреждения материала в результате испытаний на длительную прочность при двух уровнях температур T_1 и T_2 .

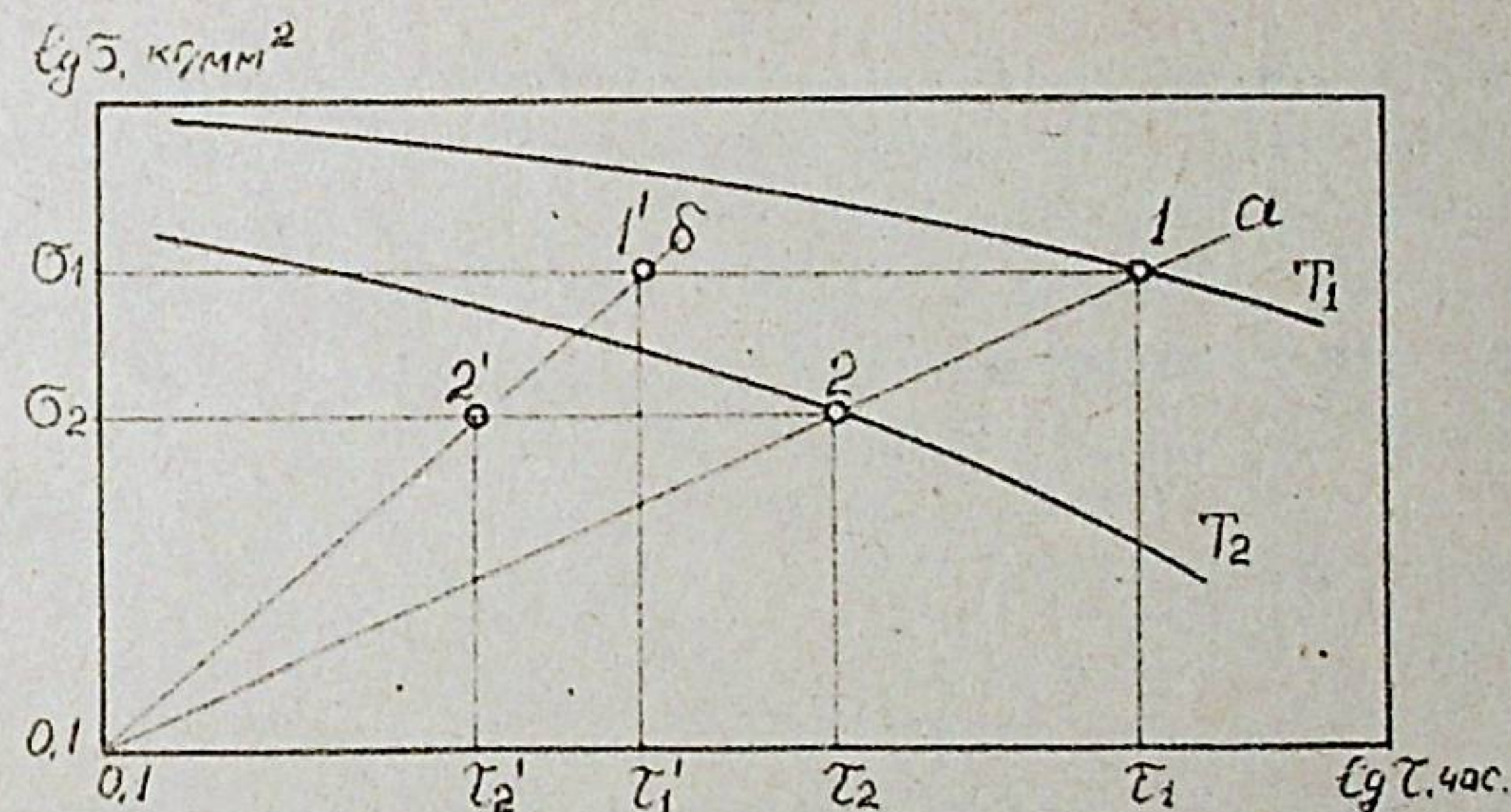


Рис. 3 Схема проведения испытаний на длительную прочность по определению положения полюса лучей эквивалентного повреждения.

Предположим, что полюс лучей эквивалентной повреждаемости при испытаниях на длительную прочность растяжением определился координатами $\sigma_0 = 0,1$ и $\tau_0 = 0,1$. Тогда луч α в точках пересечения диаграмм длительной прочности /1/ и /2/ определяет значения предполагаемо сопоставимых по эквивалентному повреждению напряжений. Горизонталы $\sigma_1 - 1$ и $\sigma_2 - 2$ рассматриваются как проекции кривых ползучести при напряжениях σ_1 и σ_2 .

Луч δ проводится из полюса так, чтобы он пересек проекции кривых ползучести на ускоренной стадии ползучести, так как структура материала, предшествующая разрушению формируется в основном на этой стадии ползучести. Межзеренное разрушение металлических материалов вследствие образования и развития пор по границам зерен происходит при их одинаковом количестве независимо от условий испытаний /температура и напряжение/, как показано в работах И.Л. Миркина о оотрудниках.

Точками 1', 2' определяются продолжительности испытаний τ_1' , τ_2' , при напряжениях σ_1 , σ_2 до накопления материалом эквивалентного повреждения при температурах T_1 , T_2 .

Дальнейшие испытания образцов производятся при одинаковых условиях, т.е. при температуре T_3 и напряжении σ_3 . Если об-

разны в процессе предварительных испытаний при температурах T_1 и T_2 получили одинаковое повреждение, то в эталонных условиях при продолжении испытаний, они должны разрушиться за одно и то же время /в пределах естественного разброса/. Если этого не произошло, то испытания следует повторить при температуре T_2 опытным путем определить продолжительность испытаний τ_2' . После этого можно скорректировать ранее выбранные ориентировочные условия предполагаемого эквивалентного повреждения и положение полюса.

Проведенные в реферируемой работе испытания при растяжении жаропрочных сталей и сплавов по описанной схеме подтвердили правильность сделанных предположений.

На сплаве ЭИ 617 проведены металлографические исследования с использованием электронного микроскопа типа ИМ-13.

Структура поврежденного материала при температурах 800 и 850°C, напряжениях 25 и 14,1 кг/мм² после предварительного нагружения в течение 90 и 25 часов соответственно, была примерно одинаковой. Не обнаружено также различие в структуре предварительно поврежденных образцов эквивалентными условиями при последующих испытаниях до разрушения в эталонных условиях /напряжении 15 кг/мм² и температуре 850°C/.

Первичные кривые ползучести для указанных значений напряжений подобны. Кривая для меньшего уровня напряжения и более высокой температуры располагается над кривой для большего значения напряжения при меньшем уровне температуры.

При больших длительностях испытаний, как уже отмечалось, могут измениться механизмы деформирования и условия подобия, на основании которых осуществляется корреляция между характеристиками длительной прочности. Методика построения обобщенных диаграмм, являющихся заключительным этапом обработки экспериментальных данных новым методом, весьма чувствительна к изменению закономерностей деформирования материалов и позволяет улавливать изменившиеся условия подобия между коррелирующими с точки зрения эквивалентного повреждения, значениями напряжений.

Предлагаемый метод прогнозирования характеристик длительной прочности не вызывает необходимости увеличения объема про-

водимых в настоящее время стандартных испытаний. Определить условия эквивалентности повреждения с достаточной для практических расчетов точностью можно косвенными методами, не прибегая к экспериментальной проверке по выше описанной методике.

Практическое решение задач прогнозирования характеристик длительной прочности предлагаемым методом осуществляется по схеме, приведенной на рис.4.

По осредненным кривым длительной прочности, построенным на основании известных методов обработки результатов испытаний, для трех уровней температур T_1, T_2, T_3 /при одинаковой базе испытаний τ_0 / определяется положение полюса лучей эквивалентного повреждения /координаты σ_0, τ_0 /, методом последовательных приближений или с помощью ЭВМ в соответствии с предполагаемым условием подобия /1 - на рисунке 4а/.

Затем опытные данные, или их осредненные значения по кривым длительной прочности, пересчитываются по уравнению /2 - на рис.4а/ и заносятся в таблицу I /рис.4/.

На основании табличных данных строятся приведенные кривые длительной прочности в координатах $\sigma - K$ /рис.4б/.

Замечательным свойством приведенных кривых длительной прочности является то, что при одинаковой продолжительности испытаний протяженность кривых для более высоких уровней температур всегда больше. Кроме того, условия подобия между коррелируемыми значениями напряжений осуществляется в вертикальных сечениях этих кривых, как показано на рис.4б секущими $K\delta, K\delta', K\delta''$. Эта особенность приведенных кривых используется для прогнозирования характеристик длительной прочности на более низкие уровни температур на основании графической обобщенной диаграммы длительной прочности.

Обобщенная диаграмма длительной прочности для всего температурного интервала /рис.4,в/ строится на основании приведенных кривых.

Поскольку между значениями напряжений, определяющимися точками пересечения приведенных кривых длительной прочности вертикальными секущими, существует условие подобия в опреде-

ленном интервале значений переменной K , то расстояния между изотермами T_1 , T_2 и T_3 на обобщенной диаграмме /рис.4, в/ будут равны или кратны разностям в значениях этих напряжений $\Delta \sigma_1$ и $\Delta \sigma_2$ в сечении $K \delta$ /.

На расстояниях, равных или кратных 1 - 2 и 2 - 3 откладываются вертикальные изотермы T_1 , T_2 и T_3 обобщенной диаграммы /4, в/. Точки 1, 2 и 3 приведенных диаграмм переносятся на соответствующие изотермы обобщенной диаграммы, 1, 2, 3 / и через них проводится прямолинейный луч. По такому же принципу переносятся на изотермы обобщенной диаграммы точки еще для двух секущих $K \delta'$ и $K \delta''$, а точка пересечения этих лучей P_1 принимается за полюс обобщенной диаграммы /4, в/.

В связи с тем, что приращение напряжения $\Delta \sigma(T, K)$ при эквивалентном повреждении материала в условиях разных температур, отражает особенность материала сопротивляться длительному разрушению в данном температурном интервале, то взаимное расположение изотерм на обобщенной диаграмме графически отражает эту закономерность. Таким образом индексы T_1 , T_2 и T_3 являются лишь пометками при соответствующих изотермах, во взаимное расположение которых не вносится никакого другого условия, кроме установливаемого на основании экспериментальных данных.

Экстраполирование на основании обобщенной диаграммы при наличии результатов испытаний при нескольких уровнях температур в пределах одинаковой базы $\tau \delta$ / может быть осуществлено только для минимальной температуры интервала следующим образом.

Для приведенных диаграмм проводится секущая K_i /рис.4б/, которая, вследствие отсутствия материальных точек для кривой T_1 пересекает лишь кривые T_2 и T_3 . Полученные материальные точки e и f переносятся на соответствующие изотермы T_2 и T_3 . Из полюса, через эти точки, проводится луч до пересечения с изотермой T_1 . Точкой пересечения этого луча с изотермой определяется значение напряжения для температуры T_1 , эквивалентное значениям напряжений в точках пересечения секущей K_i с изотермами T_2 и T_3 / σ_e и σ_f /.

Экстраполирование можно проводить и по одной приведенной кривой в пределах наличия материальных точек, как это видно из рис.4, б для кривой T_3 . Однако, в этом случае должна быть уве-

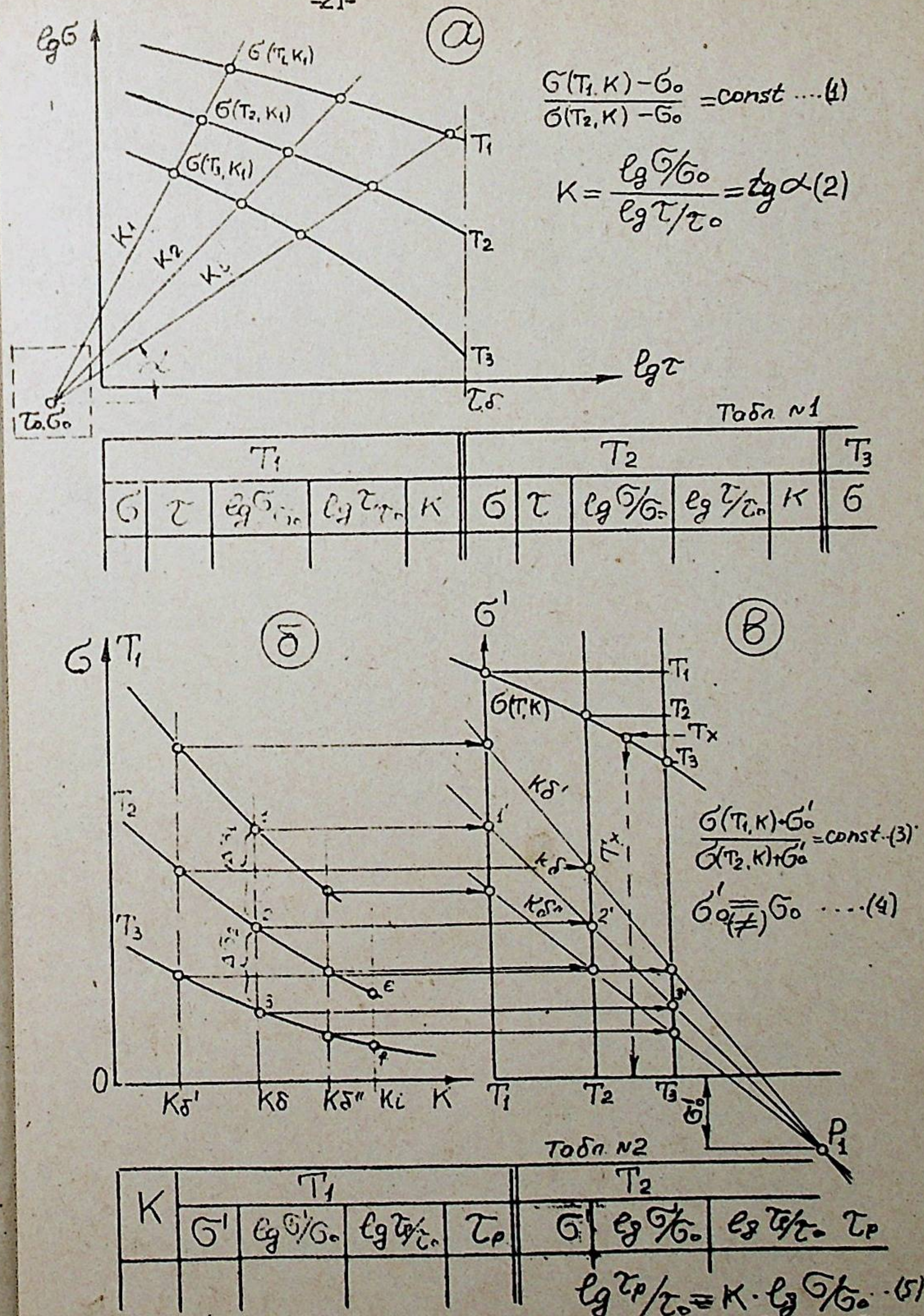


Рис. 4. Схема решения задач прогнозирования длительной прочности методом построения обобщенной диаграммы.

ренность в том, что условия подобия между коррелирующимися значениями напряжений не изменятся.

В общем случае, как это было показано при анализе экспериментальных данных, приведенных на рис.1, вследствие изменения механизмов деформирования с увеличением продолжительности испытаний, могут меняться условия подобия между коррелирующимися при разных температурах значениями напряжений.

При достаточной продолжительности испытаний при температурах T_2 и T_3 , а следовательно и большой протяженности приведенных кривых, новое условие подобия определится другим положением полюса для обобщенной диаграммы при значениях $K_i > K_3$.

В этом случае, т.е. при изменившихся условиях подобия, через материальные точки e , f и полюс P_1 не представляется возможным провести прямолинейный луч. Аналогичным описанному способу для трех уровней температур, новое положение полюса определяется по приведенным кривым для 2-х температур T_2 и T_3 .

При этом принимается предположение: если между значениями напряжений для трех /нескольких/ уровней температур существовали корреляционные связи на основании одних условий подобия, то они будут существовать для этих уровней температур и при изменившихся условиях подобия, определенных на основании экспериментальных данных для двух /нескольких/ более высоких уровней температур.

Расчетным способом, на основании обобщенной диаграммы, можно определять характеристики длительной прочности для любых уровней температур внутри исследованного интервала, для которых испытания не проводились.

Для этого необходимо построить равномерную шкалу температур, как показано на рис.4 в, справа и определить характер кривой температурной зависимости напряжения $\sigma(T, K)$, на основании которой производятся пересчеты по схеме, приведенной на рисунке для температуры T_x , не требующей дополнительного пояснения.

Данные обобщенной диаграммы пересчитываются по формуле 5, приведенной на рис.4 в и заносятся в таблицу 2 /рис.4/.

На основании этих данных строятся расчетные кривые длительной прочности в принятой системе координат и сопоставляются с экспериментальными.

Уравнение состояния эквивалентного повреждения материала, на основании которого решаются задачи прогнозирования характеристик длительной прочности по обобщенной диаграмме длительной прочности имеет следующий вид:

$$\sigma(T_i, K) = \sigma(T_l, K) + \Delta \sigma(\Delta T, K) \quad /5/$$

Величина условного предела длительной прочности $\sigma(T_l, K)$ для данного уровня температуры T_l в условиях эквивалентного повреждения материала определяется величиной условного предела длительной прочности $\sigma(T_i, K)$ для более высокого уровня температуры T_i и плюс приращение напряжения $\Delta \sigma(\Delta T, K)$, вызываемое разностью температур.

Численные величины значений напряжений, вызывающих эквивалентное повреждение в материале при разных температурах, однозначно определяются точками пересечения кривых длительной прочности для этих температур секущими K_i , положение которых устанавливается экспериментально в соответствии с равенством /см. рис.4, а/.

$$K = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\lg \sigma - \lg \sigma_0}{\lg T - \lg T_0} \quad /6/$$

Корреляция между значениями напряжений при эквивалентном повреждении осуществляется в соответствии с условием подобия, которое вытекает из принципа обобщенной диаграммы.

$$\frac{\sigma(T_i, K) - \sigma_0}{\sigma(T_l, K) - \sigma_0} = \text{const} \quad /7/$$

Ордината полюса лучей эквивалентного повреждения (σ_0)

в обобщенной диаграмме может занимать положение на оси абсцисс $/\sigma_0 = 0/$, выше оси $/\sigma_0 > 0/$, ниже оси $/\sigma_0 < 0/$. В зависимости от положения полюса, характеристики ординаты σ_0 , условие /7/ будет иметь различный вид:

$$\text{при } \sigma_0 < 0, \quad \frac{\sigma(T_1, K) + \sigma_0}{\sigma(T_2, K) + \sigma_0} = \text{const}, \quad /8/$$

$$\text{при } \sigma_0 = 0, \quad \frac{\sigma(T_1, K)}{\sigma(T_2, K)} = \text{const} \quad /9/$$

Могут быть случаи, когда полюс Р обобщенной диаграммы располагается на бесконечности. Тогда лучи эквивалентного повреждения /на обобщенной диаграмме/ параллельны. Это означает, что приведенные кривые длительной прочности эквидистантны, т.е.

$$\Delta \sigma (\Delta T, K) = \text{const}$$

При обработке экспериментальных данных из приведенных в литературе источников, когда не представляется возможным экспериментально определить условия эквивалентного повреждения и отсутствует другая информация, кроме первичных кривых длительной прочности, можно /в том случае, когда разность в температурах постоянна, например 50° / воспользоваться следующим приемом.

Из точки с координатами $\lg \sigma_0 = 0$ и $\lg \tau_0 = 0$ проводится ряд прямолинейных лучей, аналогично тому как это выполнено на рис.4.а. По значениям напряжений, определившимися точками пересечения кривых длительной прочности лучами, построить график в координатах $\sigma(T_1, K) - \sigma(T_2, K)$, как показано на рис.5.

При одинаковой разнице в температуре, предположительно коррелирующиеся значения напряжений аппроксимируются для каждой пары температур кривыми /прямыми/ имеющими тенденцию к пересечению в одной точке, как показано на рисунке пунктиром. При этом должна соблюдаться строгая последовательность в их взаимном положении: сначала высокие, затем низкие температуры.

Определять действительные условия подобия для коррелируемых значений напряжений следует лишь в том температурном интервале, в котором соблюдается указанная последовательность

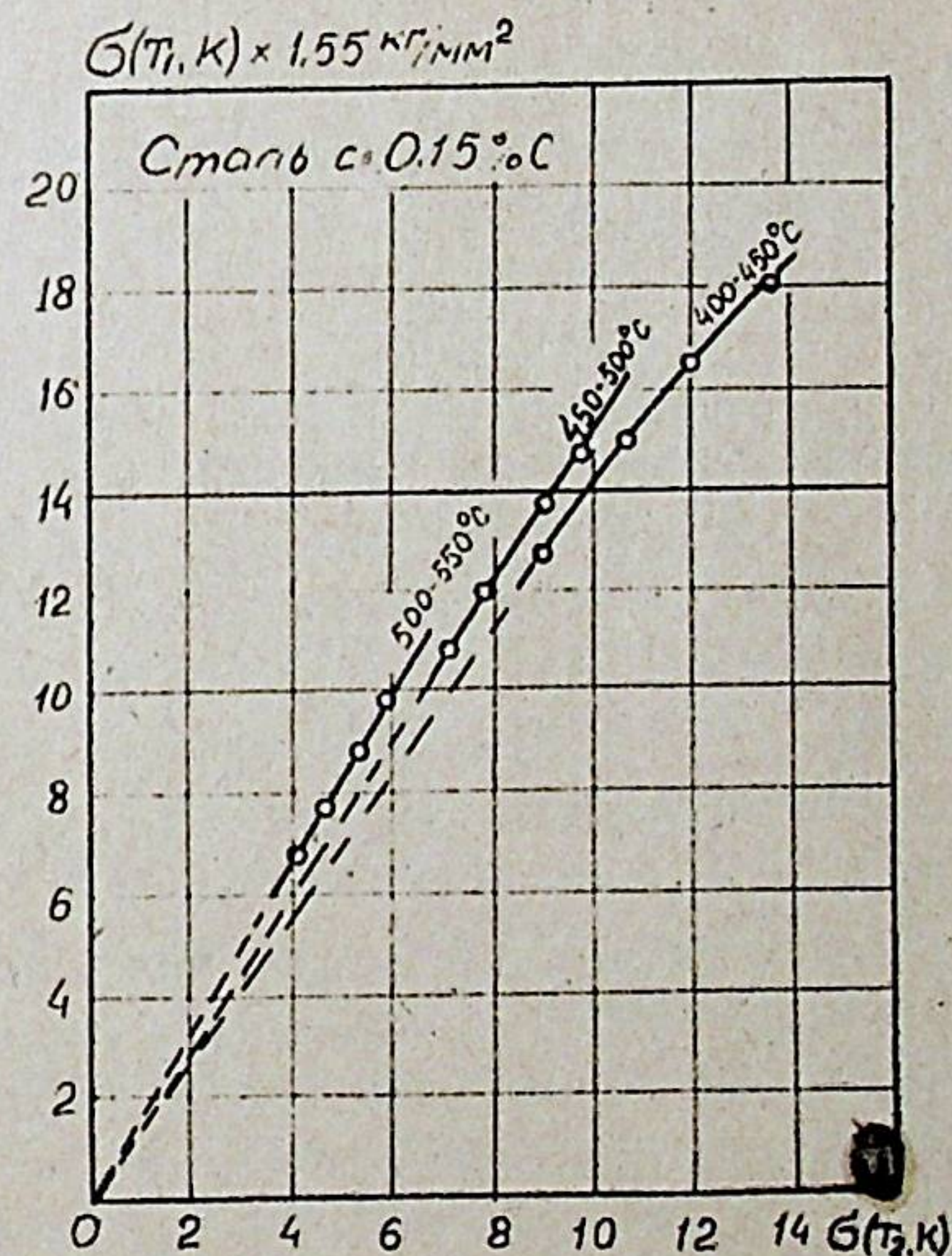


Рис.5 График зависимости сопоставимых значений напряжений.

расположения графических зависимостей

Согласно приведенным на рис.5 данным корреляционные связи между значениями напряжений в условиях эквивалентного повреждения должны существовать во всем температурном интервале, т.е. в интервале $400 - 550^\circ\text{C}$.

Предлагаемый метод описания и прогнозирования характеристик длительной прочности с помощью графического построения обобщенных диаграмм длительной прочности, в отличие от известных температурно-временных методов /в том числе и параметрических/ не накладывает на результаты испытаний связей, свойственных обобщенному методу. Зависимость между напряжением, временем и температурой устанавливается в каждом конкретном случае структурой обобщенной диаграммы и более достоверно отражает особенности данного материала сопротивляться длительному разрушению в рассматриваемом интервале температур.

Глава III. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ.

Рассмотрены экспериментальные данные по длительной прочности перлитной стали в интервале температур 450 - 600°C через 25°, полученные Т.Прнка и В.Фолдина. Испытания сопровождались металлографическими исследованиями характера разрушения и представлены авторами прямолинейными отрезками с двумя переломами в логарифмических координатах, аналогично рис. I.

Наличие экспериментальных данных в табличном виде позволяет проводить их оценку независимо от той которая дана авторами.

Графические зависимости времени до разрушения от напряжения, построенные автором настоящей работы, на основании указанных табличных данных, в логарифмических координатах имеют криволинейный характер с немонотонной кривизной, максимум кривизны при более высоких температурах сдвигается в направлении меньших длительностей, кривые расходящиеся при больших длительностях до разрушения.

С учетом установленной металлографической смены механизмов деформирования, приводящим к разным видам разрушения /внутреннее и два вида межзеренного/ поведение исследованной перлитной стали следует отнести к наиболее общему случаю сопротивляемости материала длительному разрушению.

Именно для решения задач прогнозирования такого общего вида разработан предлагаемый метод, не исключающий возможности решения и более простых.

В связи с имеющей место в действительности сменой механизмов деформирования и разрушения во времени для каждого уровня температур, можно предполагать несколько /2 или 3/ условий подобия между коррелирующимися значениями напряжений при эквивалентном повреждении материала.

Это предположение подтверждается в частности тем, что построенная обобщенная диаграмма аппроксимируется из двух полюсов. При этом результаты испытаний при высоких значениях на-

пряжений аппроксимируются из полюса, расположенного ниже оси абсцисс / $\sigma_0 < 0$ /, когда соблюдается условие подобия:

$$\frac{\sigma(T, K) + \sigma_0}{\sigma(T, K) + \sigma_0} = \text{const}$$

а средние и низкие значения напряжений аппроксимируются из полюса, расположенного на оси абсцисс / $\sigma_0 = 0$ /, при условии подобия имеющего вид:

$$\frac{\sigma(T, K)}{\sigma(T, K)} = \text{const}$$

Расчетные кривые длительной прочности, перестроенные из обобщенной диаграммы, практически совпадают с исходными кривыми, полученными экспериментально.

С целью проверки возможного достоверного прогнозирования характеристик длительной прочности методом построения обобщенных диаграмм были рассмотрены экспериментальные данные, полученные К. Бунгардом при испытаниях хромоникелевой стали при температурах 600, 650, 700°C на базе до 28000 часов /600°C/.

В качестве базы, при которой определены условия подобия и построена, на основании экспериментальных данных, обобщенная диаграмма, принята продолжительность испытаний до 6000 часов /для всех температур/.

Обобщенная диаграмма для исследованного материала описывается пучком прямолинейных лучей из одного полюса, расположенного на оси абсцисс / $\sigma_0 = 0$ /; что соответствует условию подобия, выраженному уравнением / 9 /.

Прогнозируемые характеристики длительной прочности на основании предлагаемого метода до 28000 часов находятся в весьма хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Расчетные диаграммы практически совпадают с экспериментальными.

Рассмотрен пример, на основании результатов испытаний хромоникелемолибденовой стали при температурах 600, 625, 650, 675 и 700°C; когда все кривые длительной прочности не могут исследоваться в одном температурном интервале. Этот вывод можно сделать сразу же после построения графика зависимости $\sigma(T_1, K) - \sigma(T_2, K)$, аналогично рис.5.

Обобщенные диаграммы длительной прочности строились попарно для температур 700 - 675°C, 675 - 650°C, 650 - 625 - 600°C. В каждом случае имеет место одно условие подобия. Последовательное прогнозирование для меньших уровней температур 625 и 600°C, позволило получить экстраполированные данные до 100000 часов, сопоставленные с прогнозированными на основании параметрической зависимости Шерби-Дорна. Разница в значениях прогнозируемых напряжений по указанным двум методам не превышает 1%.

В диссертации проанализированы опытные данные по результатам длительных испытаний: углеродистой раскисленной стали при температурах 400, 450, 500°C с максимальной продолжительностью испытаний 50000 часов; хромомарганцевой жаропрочной стали аустенитного класса при температурах 550, 600, 650 и 700°C с максимальной продолжительностью испытаний 15000 часов; кривые длительной прочности которой аппроксимируются расходящимися прямыми.

Во всех рассмотренных случаях имеет место хорошее соответствие прогнозируемых характеристик длительной прочности методом обобщенных диаграмм с данными, прогнозированными авторами указанных работ другими методами.

В реферируемой работе рассмотрены также примеры решения задач описания и прогнозирования характеристик длительной прочности жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Возможность применения метода обобщенных диаграмм для описания и прогнозирования длительной прочности хромокобальт-никелевого сплава проверялась на основании результатов испытаний при температурах 650, 700, 750, 815 и 850°C с максимальной продолжительностью испытаний 20000 часов; сплава инконель 718 при температурах 1000, 1100, 1200 и 1300°F с максимальной продолжительностью испытаний до 32000 часов.

Показано, что зависимостям времени до разрушения от напряжения и температуры для жаропрочных сталей и сплавов на основе твердых растворов присущи общие закономерности, которые позволяют с одинаковой достоверностью описывать и прогнозировать характеристики длительной прочности методом построения обобщенных диаграмм.

Результатами испытаний большой продолжительности подтверждены исходные предпосылки метода обобщенных диаграмм, сформулированные в 1-й и 2-й главах.

Показано, что в тех случаях, когда параметрические методы позволяют получать достоверные прогнозируемые характеристики длительной прочности, последние совпадают с данными прогнозирования на основе метода обобщенных диаграмм.

Глава 1У. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ДИАГРАММ И МЕТОДАМИ, ОСНОВАННЫМИ НА ИЗВЕСТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ УРАВНЕНИЯХ.

Рассмотрены результаты испытаний 4-х типов жаропрочных сталей с максимальной продолжительностью испытаний до 20000 часов при 3-х, 4-х уровнях температур. Во всех случаях авторы цитируемой работы получили хорошее соответствие с экспериментальными данными прогнозируемых характеристик длительной прочности с помощью наиболее широко распространенных параметрических зависимостей длительной прочности /Ларсона-Миллера, Шерри-дюрна, Китти-дьювала и Мурри/.

Поскольку экспериментальные и экстраполированные характеристики длительной прочности рассматриваемых материалов приводятся Джонсоном и др. не только графически, но и в виде табличных данных, то при их обработке полностью исключается возможность субъективного подхода автора настоящей работы в оценке возможностей изванных выше методов.

Прогнозируемые методом обобщенных диаграмм характеристики длительной прочности находятся в хорошем соответствии с экстраполированными параметрическими методами.

Все данные по численному сопоставлению прогнозируемых характеристик всеми рассмотренными методами сведены в таблицы и приводятся в приложениях к реферируемой работе, позволяя, таким образом, объективно оценить возможности различных методов.

Возможности решения задач прогнозирования длительной прочности температурно-временным уравнением, предложенным И.И. Труниным, в сопоставлении с методом обобщенных диаграмм, рассмотрены на примере результатов испытаний жаропрочной стали 100CrMo910 при температурах 500, 550 и 600°C с максимальной продолжительностью испытаний до 40000 часов.

Ценность используемой работы заключается в том, что в ней обобщены /Руттманом и Опелем/ результаты испытаний 25 плавок стали 100CrMo910, которые проводились пятью лабораториями по одной программе.

Предложенное И.И. Труниным температурно-временное уравнение

$$\tau = A \frac{T^b}{G^x} \exp \frac{U_0 - CG}{RT}$$

/10/

предполагает определение коэффициентов A , U_0 , C на основании машинной обработки большого статистического экспериментального материала.

Анализируемые результаты содержат такие данные.

Наличие экспериментальных данных в табличной форме для всех исследованных плавок позволило нам выбрать две плавки, наиболее полно представленные результатами испытаний максимальной продолжительности и на их основании провести проверку нового метода в сопоставлении с методом, основанным на использовании уравнения /10/, а также оценить влияние статистической обработки всей совокупности результатов испытаний на изменение характера корреляционных связей между значениями напряжений в исследованном интервале температур.

Показано, что для установления действительно существующих корреляционных связей между напряжениями в исследуемом интервале температур, исследования необходимо проводить на материале одной плавки с соблюдением единой технологии механической и термической обработки испытуемых образцов, а также надлежащей корректностью проведения эксперимента.

Последующими испытаниями большого количества плавок в ограниченном интервале напряжений и продолжительностей испытаний можно оценить разброс экспериментальных данных и определить границы доверительных интервалов, которые практически не меняются по отношению к средней линии. Этим можно значительно сократить объем испытаний без понижения достоверности прогнозируемых характеристик.

Прогнозируемые по уравнению /10/ и методу построения обобщенных диаграмм характеристики длительной прочности приведены в табличном виде и находятся в приемлемом для практических расчетов соответствии.

Проведен анализ уравнения /10/ с точки зрения возможности его применения для решения задач определенного класса /аналогично параметрическим зависимостям/.

Показано, что при переходе от одной температуры к другой на одном уровне напряжения приращение логарифма длительности до разрушения прямо пропорционально значению напряжения.

$$\Delta \lg \tau = a - b \sigma$$

/11/

$$a = \frac{U_0}{2,3R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + 2 \lg \frac{T_1}{T_2} = \text{const}; \quad b = \frac{\gamma}{2,3R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \text{const}.$$

Таким образом, уравнение /10/ применимо для решения задач описания и прогнозирования длительной прочности в тех случаях, когда кривые длительной прочности в интервале температур, контролируемым единым характером повреждения материала, криволинейны, монотонны и расходящиеся /в логарифмических координатах/.

К уравнению /11/ приводятся температурно-временные зависимости, предложенные Б.А.Нинесом и Я.Б.Гегузиным, несмотря на различие исходных предположений.

На основании рассмотренных в 3-й и 4-й главах примеров показано, что новый метод описания и прогнозирования характеристик длительной прочности позволяет получать достоверные результаты во всех случаях, для решения каждого из которых необходимо выбирать ту или иную температурно-временную зависимость /в том числе и параметрическую/, а также для случаев, когда температурно-временные зависимости не позволяют получать достоверные решения /при немонотонной кривизне диаграмм длительной прочности/ и вызывают необходимость определения новых значений коэффициентов.

Все рассмотренные примеры доведены до численных решений в виде таблиц, сведенных в "приложения", позволяя проследить последовательность решений и оценить достоверность прогнозируемых характеристик в сопоставлении с экспериментальными или определенными другими методами.

Глава V. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ МАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ.

На основании исходных предпосылок, сформулированных для описания и прогнозирования характеристик длительной прочности, показана возможность решения задач описания и прогнозирования минимальных скоростей ползучести и заданной деформации ползучести.

Зависимости минимальных скоростей ползучести от напряжения описываются аналогичными аналитическими уравнениями, что и зависимости времени до разрушения от напряжения. Кривые зависимостей минимальных скоростей ползучести от напряжения "зеркальны" кривым зависимостей времени до разрушения от напряжения в одинаковой системе координат /логарифмической или полуллогариф-

мической/.

Аналогично тому, как для диаграмм длительной прочности, для диаграмм минимальных скоростей ползучести подобие, анализируемых характеристик, основанное на принципе эквивалентного повреждения, может существовать в тех же температурных интервалах.

Уравнение состояния эквивалентного повреждения материала в этом случае имеет вид:

$$\sigma(T, \gamma) = \sigma(T_0, \gamma) + \Delta \sigma(\Delta T, \gamma) \quad /12/$$

где γ - характеристика углов наклона к оси скоростей ползучести лучей эквивалентного повреждения /равна по абсолютному значению величине k и обратна по знаку/.

$$\gamma = \frac{\lg V_0 - \lg V}{\lg \sigma - \lg \sigma_0} \quad /13/$$

Условия подобия при этом представляется уравнением /7/.

Решение задач описания и прогнозирования минимальных скоростей ползучести производится аналогично тому, как и длительной прочности, по схеме, приведенной на рис. 4.

В реферируемой работе приведен пример решения такой задачи для сплава *CuFeNiCo* при температурах 750, 850, 950, 1050° в интервале скоростей ползучести, эквивалентных испытаниям на длительную прочность в пределах 10-100000 часов. При этом показано, что кривые минимальных скоростей ползучести не могут быть использованы для достоверного прогнозирования характеристик длительной прочности и сокращения продолжительности испытаний, во-первых потому, что при определении минимальных скоростей ползучести, в зависимости от базы испытаний и масштаба, в котором воспроизведены первичные кривые ползучести, ошибки в определении минимальных скоростей превышают один порядок; а во-вторых - "зеркальность" тех и других кривых при больших длительностях не подтверждается экспериментально.

На основании тех же исходных предпосылок решаются задачи описания и прогнозирования заданных деформаций ползучести в зависимости от напряжения и времени, которые аппроксимируются в логарифмических координатах такими же кривыми как и кривые длительной прочности и, в общем случае, не только им не эквивалентны, но отличаются и по характеру.

Подобие между значениями напряжений, вызывающих заданную деформацию ползучести при разных уровнях температур и эквивалентном повреждении материала выполняется лучше по сравнению с подобием между значениями напряжений, вызывающих разрушение /длительная прочность/ при тех же уровнях температур.

Это объясняется тем, что в первом случае /ползучесть/ значения напряжений близки к действительным величинам напряжений, имеющим место в испытуемом образце, особенно при малых деформациях. Во втором случае /длительная прочность/ значения напряжений значительно отличаются от фактически действующих в испытуемом образце, особенно при больших пластических деформациях.

В качестве примеров решены задачи прогнозирования величин напряжений, вызывающих 1 %-ю ползучесть сплава инконель X-750 при температурах 649, 730, 811, 861 °C при длительностях до 10000 часов; сплава инконель 718 при температурах 538, 593, 649, 704 °C с максимальной продолжительностью испытаний 30000 часов; хромомолибденованадиевой стали при температурах 900, 1000, 1050, 1100 °C с максимальной продолжительностью испытаний 70000 часов.

Во всех случаях получено хорошее совпадение прогнозируемых, на основании обобщенных диаграмм, характеристик с экспериментом. Рассмотрены вопросы прогнозирования деформаций ползучести на основании первичных кривых ползучести.

Показано, что первичные кривые ползучести могут быть подобны при испытаниях в условиях растяжения при одном уровне температуры лишь в ограниченном интервале напряжений, т.е. в интервале возможного преобладающего влияния одного механизма деформирования /см.рис.1/. Таким образом при решении задач прогнозирования на большие сроки службы необходимо рассматривать лишь кривые ползучести, относящиеся к области малых напряжений /больших длительностей испытаний/.

Практически такой подход не выгоден, поскольку он сопряжен с необходимостью проведения длительного корректного эксперимента на ползучесть продолжительностью более 30000 часов при необходимости экстраполирования до 100000 часов.

Сократить продолжительность испытаний на ползучесть при необходимости длительного прогнозирования возможно при исследовании результатов испытаний, получаемых при нескольких уровнях температур и сопоставлении кривых ползучести при коррелирующихся с

точки зрения эквивалентного повреждения, значениях напряжений /для разных уровней температур/.

Кривые ползучести могут быть подобными, с точки зрения эквивалентного повреждения, лишь до ускоренной стадии ползучести /Ю.Н.Работнов/, до начала которой накопление пластической деформации в ограниченном интервале напряжений имеет закономерный характер. С наступлением ускоренной стадии ползучести закономерность накопления пластической деформации может меняться /если она вообще существует/ или полностью отсутствовать.

В связи с этим, весьма важное значение имеет вопрос достоверного определения начала третьего периода кривых ползучести.

В реферируемой работе предложен способ численного определения ускоренной стадии ползучести с помощью параметра $\alpha = \tau / \epsilon$, где ϵ - деформация ползучести, накопленная в образце за время τ .

Параметр $\alpha(\tau, \epsilon)$ позволяет определять начало третьего участка кривых ползучести независимо от системы координат и масштаба, в котором воспроизводятся первичные кривые ползучести, полностью исключая возможность субъективных ошибок, присущим известным графическим методам.

До начала третьего участка ползучести значения $\alpha(\tau, \epsilon)$ возрастают, а затем убывают. Графически в координатах $\epsilon - \alpha$ до начала третьего периода кривая $\alpha(\tau, \epsilon)$ аналогична кривой ползучести, а с наступлением ускоренной стадии ползучести, изменяет направление на обратное. Точка перегиба кривой с координатами ϵ_3, α_3 однозначно определяет наступление ускоренной стадии ползучести.

С помощью параметра $\alpha(\tau, \epsilon)$ проведен анализ большого количества первичных кривых ползучести в широких интервалах температур и продолжительностей испытаний.

Показано, что в общем случае, кривые геометрического места точек предельных разрушающих деформаций $\epsilon_p(\sigma)$ и кривые геометрического места точек начала третьего периода ползучести $\epsilon_3(\sigma)$ не только не эквидистантны, но и отличаются между собой по форме.

На рис.6 приведены первичные кривые ползучести хромоникель-молибденовой стали в логарифмических координатах /А.Тум, К.Рихард/ с нанесенной кривой $\epsilon_3(\sigma)$, точки для которой определены по параметру $\alpha(\tau, \epsilon)$. Как видно из рисунка, об эквидистантности можно говорить для интервала напряжений $55 + 35$ кг/мм², т.е. в пре-

делах длительностей до разрушения порядка 3000 часов. дальше, до длительностей порядка 80000 часов эта закономерность не соблюдается.

Начало ускоренной стадии ползучести для приведенных на рис. 6 кривых ползучести при малых значениях напряжений наступает при весьма малых значениях деформаций, а продолжительность испытаний до разрушения после первых стадий ползучести составляет 72% от общего времени.

В связи с этим глубокий смысл имеет установившееся в практике правило использования материала и проведение расчетов на деформации, не превышающие 1%. Поскольку эксплуатация энергетического оборудования со сроками эксплуатации 10000-200000 часов не допустима на ускоренной стадии ползучести, то для оптимальных решений необходимо располагать методами прогнозирования начала третьей стадии ползучести и первичных кривых ползучести.

Для некоторых жаропрочных сталей, легированных хромом, молибденом и ванадием, кривые геометрического места точек предельных разрушающих деформаций $\epsilon_p(\sigma)$ и кривые $\epsilon_3(\sigma)$ эквидистантны в пределах длительностей до разрушения более 10000 часов и кроме того - прямолинейны и параллельны оси времени $[\epsilon_3(\sigma) = \text{const}]$.

В этом случае, приняв за критерий разрушения величину предельной деформации разрушения, можно с помощью аналитических уравнений достоверно решать задачи описания и прогнозирования ползучести и длительной прочности.

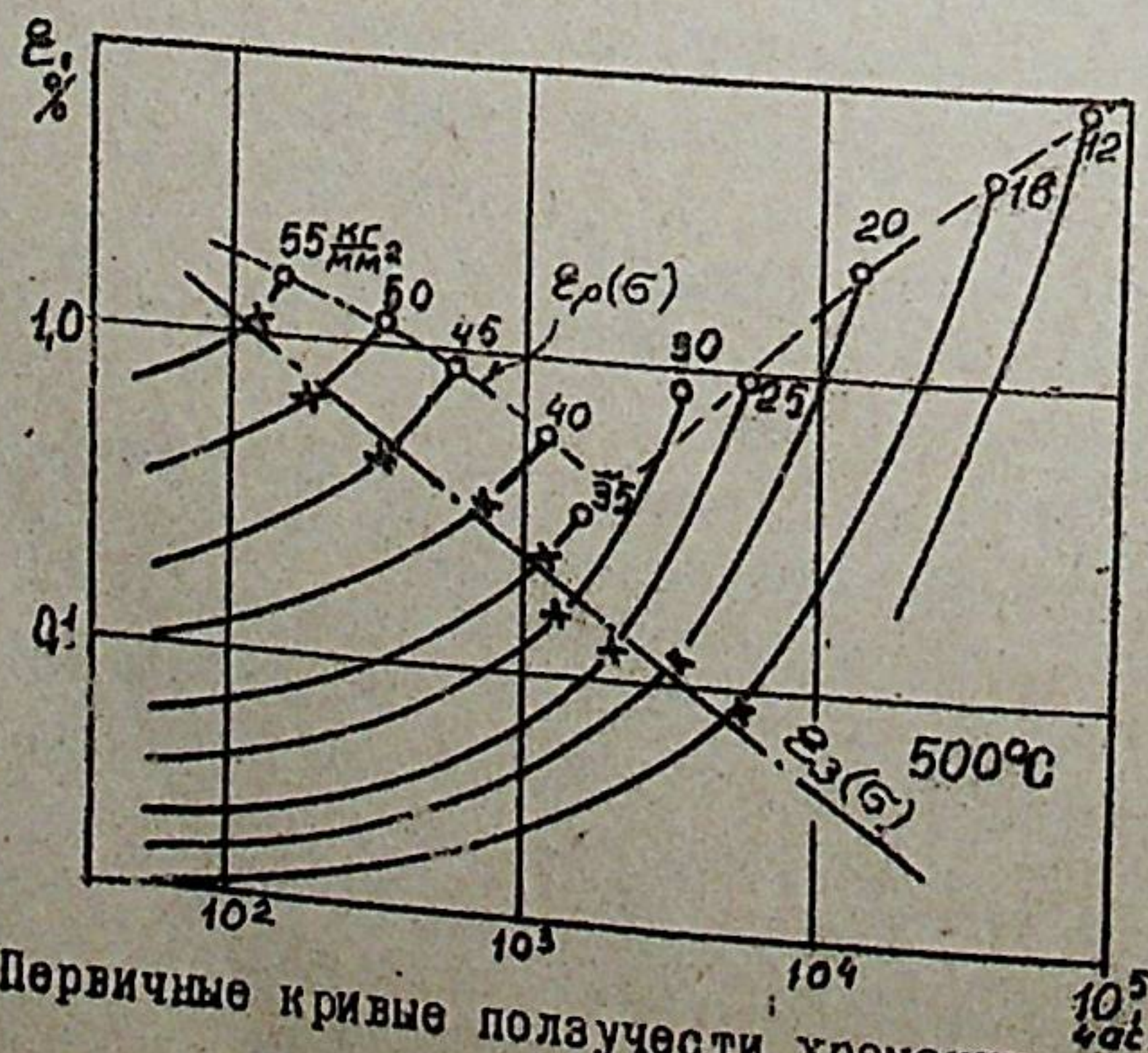


Рис. 6. Первичные кривые ползучести хромоникельмолибденовой стали.

для жаропрочных сталей аустенитного класса и сплавов на никелевой основе кривые $\epsilon_3(\sigma)$ имеют вид гипербол асимптотически приближающихся к оси времени.

Для некоторых жаропрочных сталей и сплавов кривые $\epsilon_3(\sigma)$ имеют вид восходящей выпуклой кривой /или прямой/.

В интервале больших длительностей испытаний кривые могут иметь более сложный характер /синусоида/. На рис. 7 приведены наиболее распространенные типы кривых

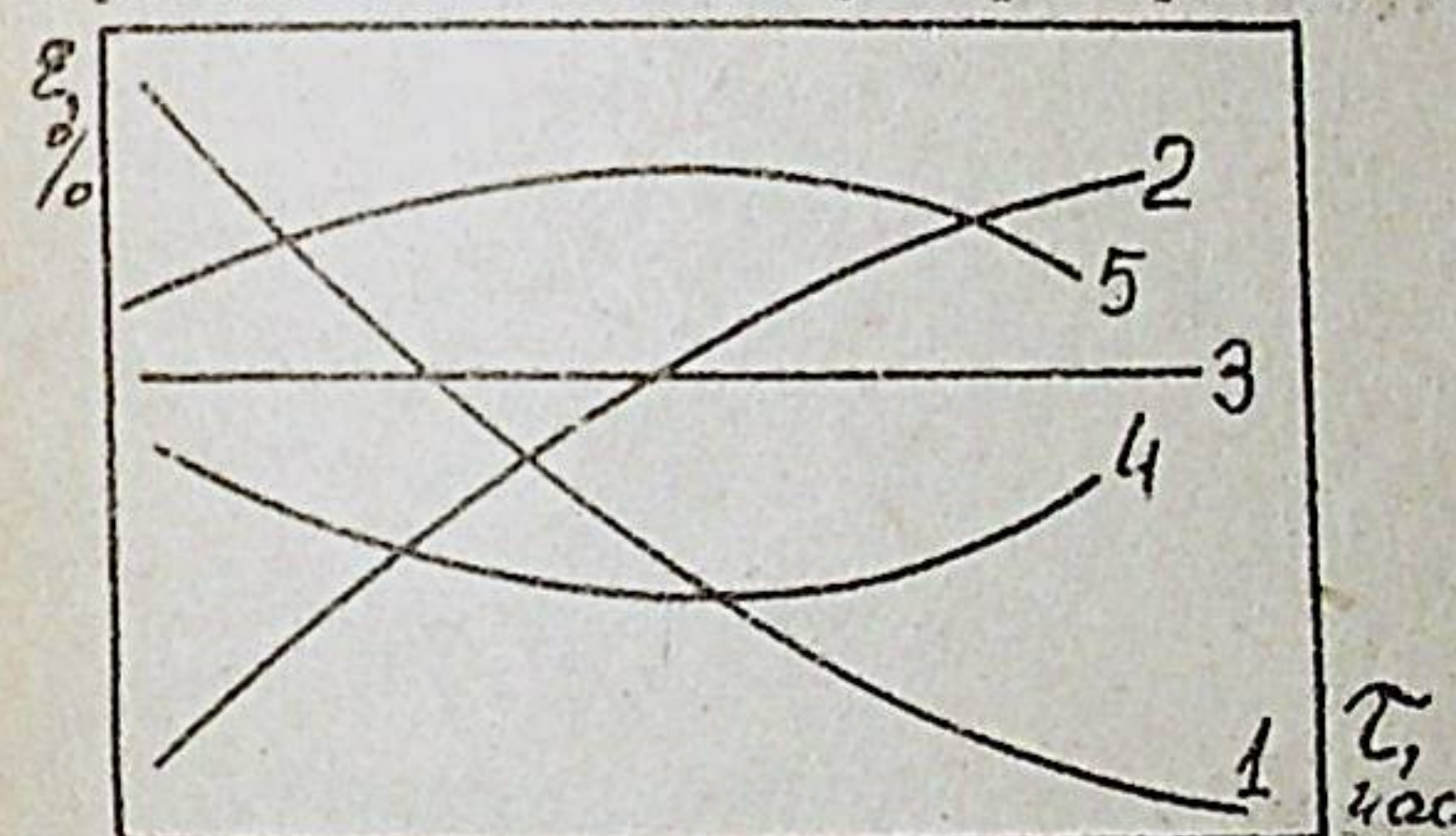


Рис. 7. Типичные кривые геометрического места точек начала ускоренной стадии ползучести $\epsilon_3(\sigma)$ жаропрочных сталей и сплавов.

Из приведенного анализа закономерностей пластического деформирования жаропрочных сталей и сплавов видно, что с помощью известных уравнений ползучести можно решать задачи лишь одного класса, т.е. те, для которых выведено данное уравнение.

Так, с помощью такого сложного уравнения ползучести как /14/

$$\epsilon = m \epsilon^{1-n} \exp[\alpha \sigma (1 + k \epsilon)] \quad /14/$$

можно решать задачи описания кривых ползучести в ограниченном интервале напряжений, характер кривой $\epsilon_3(\sigma)$ для которых соответствует графику 2 на рис. 7.

В реферируемой работе, с позиций эквивалентного повреждения, сформулированы уравнения состояния ползучести для трех наиболее общих случаев закономерностей накопления пластической деформации, представленных на рис. 7 кривыми 1, 2 и 3. Остальные, 4, 5 и др. могут рассматриваться как состоящие из этих частных случаев.

Для кривых ползучести, закономерности накопления деформации которых до начала третьего участка ползучести соответствуют графикам 1 и 2 на рис. 7, уравнение состояния имеет вид:

$$\epsilon[(\sigma - \Delta \sigma), \tau] = \epsilon(\sigma, \tau) + \Delta \epsilon(\Delta \sigma, \tau) \quad /15/$$

При этом знак "—" следует брать для графика 1, знак "+" - для графика 2.

На рис. 8 приведена схема решения задач описания и прогнозирования ползучести по уравнению состояния /15/ для случая, когда кривая $\varepsilon_3(\sigma)$ соответствует графику 1 /рис.7/.

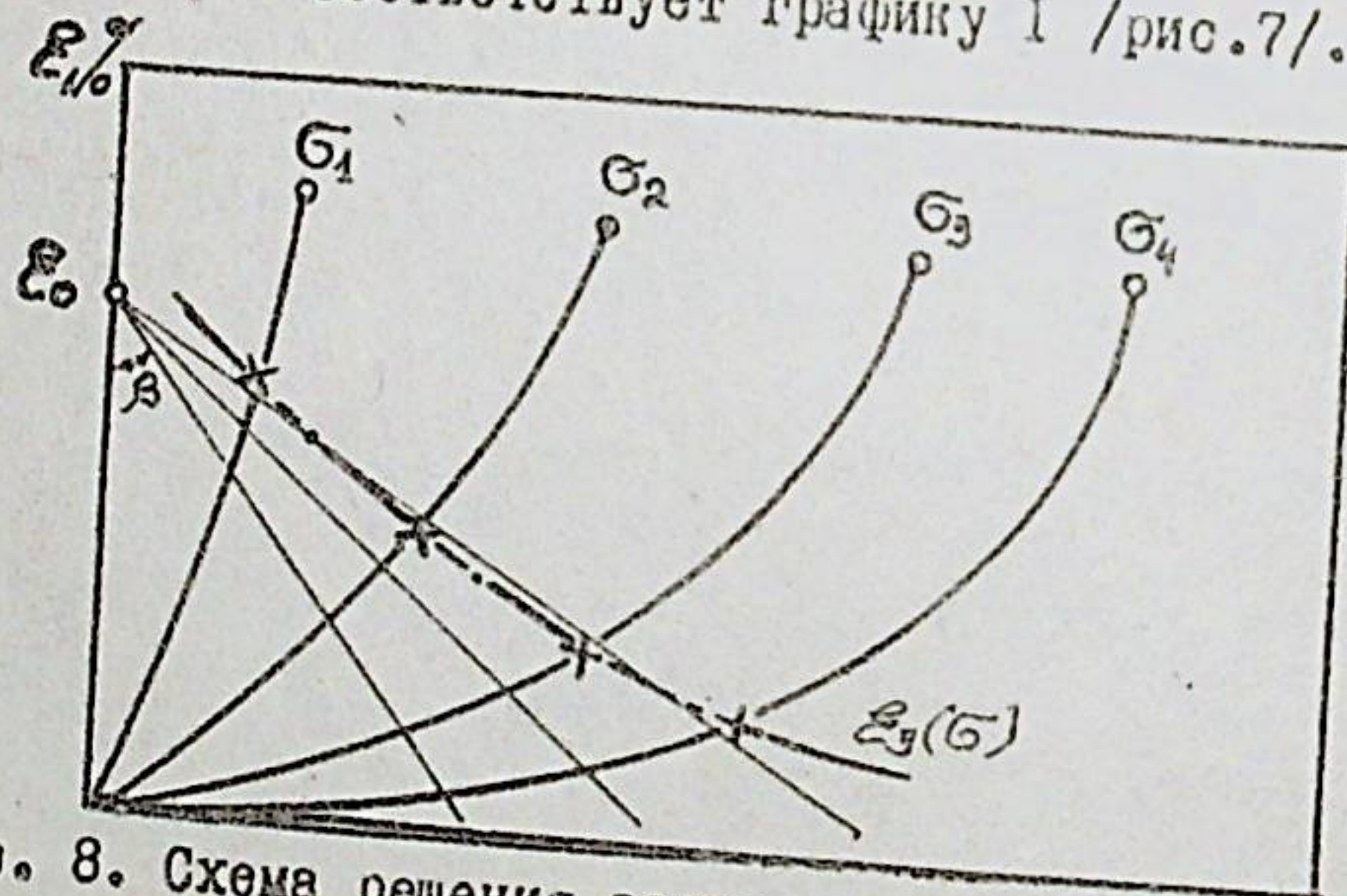


Рис. 8. Схема решения задач прогнозирования ползучести.

За эквивалентное состояние повреждения материала при ползучести принимается его состояние с наступлением ускоренной стадии ползучести, характеризуемое кривой $\varepsilon_3(\sigma)$, которая в некотором интервале напряжений может быть заменена прямой, как показано на рис. 8. Точка пересечения этой прямой с осью ординат принимается за полюс / ε_0 / лучей эквивалентного повреждения, положение которых определяется уравнением

$$\gamma = \tan \beta = \frac{\tau}{\varepsilon_0 - \varepsilon} \quad /16/$$

Условие подобия, на основании которого выполняется корреляция между значениями деформаций при эквивалентном повреждении, определяется уравнением:

$$\frac{\varepsilon(\sigma, \gamma) - \varepsilon_0}{\varepsilon[(\sigma - \Delta\sigma), \gamma] - \varepsilon_0} > 1 = \text{const} \quad /17/$$

Дальнейшее решение производится методом построения обобщенных диаграмм по схеме, приведенной на рис.4 для решения задач длительной прочности.

В качестве примера решения задачи такого типа в реферируемой работе выполнено описание известных кривых ползучести стали 30ХН2ПН, полученных Робинсоном на базе 100000 часов при темпера-

туре 450°C и 4-х значениях напряжений.

По параметру $\alpha(\tau, \varepsilon)$ определены точки перехода к третьему периоду ползучести при напряжениях 17,6 кг/мм² / $\varepsilon_3 = 0,645$, $\tau = 65000$ час./ и 14,76 кг/мм² / $\varepsilon_3 = 0,54$, $\tau = 79000$ час./ . На их основании определено положение полюса / $\varepsilon_0 = 1,1\%$ / и выполнено построение обобщенной диаграммы для 4-х уровней напряжений. Первый и последующий участок ползучести аппроксимируются разными условиями подобия /обобщенная диаграмма имеет 2 полюса/. Максимальное отклонение по деформации получено при длительности 5000 час. и составляет 5%.

Рассмотрено ряд других примеров описания и прогнозирования ползучести для разных видов кривых $\varepsilon_3(\sigma)$ в том числе и сложных /вида, представленного кривой 4 на рис.7/.

для кривых ползучести материалов, закономерность деформирования которых до третьего участка соответствует графику 2 /рис.7/, положение полюса определяется координатами ε_0, τ_0 , за пределами графика. Положение лучей эквивалентного повреждения определяется уравнением

$$\gamma = \frac{\tau + \tau_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \quad /18/$$

Условие подобия между значениями деформаций в точках пересечения лучей эквивалентного повреждения кривыми ползучести определяется уравнением

$$\frac{\varepsilon[(\sigma - \Delta\sigma), \gamma] - \varepsilon_0}{\varepsilon(\sigma, \gamma) - \varepsilon_0} > 1 = \text{const} \quad /19/$$

Следует отметить, что такой случай поведения материала, когда деформация ползучести возрастает с уменьшением напряжений и увеличением продолжительности нагружения хорошо описывается с использованием в качестве критерия удельной рассеянной в процессе ползучести работы $\sigma \cdot \varepsilon$, предложенного О.В.Сосниным на основании результатов испытаний титановых сплавов при относительно высоких значениях напряжений.

Для случая, когда кривая $\varepsilon_3(\sigma)$ характеризуется графиком 3 (рис. 7), т.е. постоянной деформацией, уравнение состояния имеет вид:

$$\varepsilon(\sigma - \Delta\sigma) = \varepsilon(\sigma) = \frac{\tau}{\gamma} = \text{const} \quad /20/$$

В качестве характеристик, по которым проводится сопоставление, рассматривается не деформация, а значения параметра γ при постоянной деформации.

При построении обобщенных диаграмм на изобарах откладываются не значения деформаций ϵ , а параметра γ .

Условие подобия осуществляется по уравнению

$$\frac{\gamma(\sigma_1, \epsilon) - \gamma_0}{\gamma(\sigma_2, \epsilon) - \gamma_0} = \text{const} \quad /21/$$

Сформулировано уравнение состояния эквивалентного повреждения материала при ползучести для сопоставляемых значений напряжений при различных температурах, определяемых одинаковостью протекающих в материале внутренних процессов.

$$\epsilon(\sigma; T, \gamma) = \epsilon(\sigma_1, T_1, \gamma) \pm \Delta\epsilon(\Delta\sigma, \Delta T, \gamma) \quad /22/$$

Уравнение /22/ решается аналогично ранее рассмотренным случаям в зависимости от особенностей кривой $\epsilon_3(\sigma)$.

Для решения задач прогнозирования ползучести на большие сроки службы следует рекомендовать методику, позволяющую прогнозировать зависимости заданной деформации ползучести от напряжения и времени /см. стр. 34/. При решении температурно-временных задач для дискретных значений деформаций ползучести /0,2, 0,5, 0,7, 1% и т.д./ всегда с достаточной для практики достоверностью возможно воспроизвести кривые ползучести для исследованного интервала температур и деформаций.

В заключение следует отметить, что разработанные в реферированной работе методы описания и прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести основаны на стремлении исключить из рассмотрения многообразие тонких и недостаточно изученных внутренних процессов, протекающих в материале на атомных уровнях при длительном высокотемпературном нагружении.

С этой целью в основу методов приняты наиболее общие, установленные теорией жаропрочности, факты поведения жаропрочных сталей и сплавов на основе твердых растворов, позволившие сформулировать само понятие эквивалентного повреждения материала для ограниченного интервала температур и решать на этой основе практические задачи.

Естественно, что для физического подтверждения понятия эквивалентного повреждения необходимы дальнейшие исследования с применением совершенной аппаратуры и приборов на основе новых методических разработок, с помощью которых было бы возможно количественно показать эквивалентность структурного состояния поврежденного материала и его взаимосвязь с прочностными характеристиками.

Основные выводы по работе сводятся к следующему:

1. Разработан метод прогнозирования характеристик длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов на основе твердых растворов на большие сроки службы по результатам испытаний ограниченной продолжительности при нескольких /минимум - трех/ уровнях температур.

Основу метода составляет понятие об эквивалентном повреждении материала и существование корреляционных связей между дискретными значениями напряжений, вызывающих разрушение при разных уровнях температур вследствие эквивалентного повреждения.

2. Предложено уравнение состояния эквивалентного повреждения материала длительным высокотемпературным нагружением для интервала температур с одинаковым характером и последовательностью протекания внутренних процессов, определяющих его особенность сопротивляться длительному разрушению.

3. Разработан графо-аналитический метод решения задач прогнозирования характеристик длительной прочности на основании предложенного уравнения состояния эквивалентного повреждения материала.

Заключительным этапом такого решения является построение обобщенной диаграммы длительной прочности для исследованного интервала температур, на основании которой осуществляется экстраполирование характеристик длительной прочности на пониженные температуры и большие длительности до разрушения по результатам испытаний меньших продолжительностей при повышенных температурах. Интерполирование характеристик длительной прочности по обобщенной диаграмме на любые уровни температур внутри исследованного интервала осуществляется после установления температурной зависимости напряжений, вызывающих эквивалентное повреждение.

4. Показаны преимущества предложенного метода прогнозирования характеристик длительной прочности по сравнению с возможностями известных температурно-временных, в том числе и параметрических методов.

Предложенный метод, в отличие от известных, не накладывает на результаты испытаний дополнительных связей, свойственных собственно методу; кроме того - позволяет корректировать условия подобия между коррелирующимися /с точки зрения эквивалентного повреждения/ величинами напряжений при изменении механизмов деформирования и решать задачи прогнозирования на основании последнего определенного условия.

5. Показана возможность прогнозирования зависимостей минимальных скоростей ползучести от напряжений, а также зависимостей заданных деформаций ползучести от напряжений /например - напряжений вызывающих деформацию ползучести в 1% при данной температуре/ аналогично тому, как решаются задачи прогнозирования характеристик длительной прочности в тех же температурных интервалах.

6. Установлена возможность решения задач прогнозирования деформации ползучести на основании первичных кривых ползучести /до начала ускоренной стадии ползучести/ на основании представлений об эквивалентном повреждении материала и существования корреляционных связей между дискретными значениями деформаций ползучести для разных уровней напряжений при эквивалентном повреждении материала.

7. Предложен метод численного и однозначного определения начала ускоренной стадии ползучести для первичных кривых, независимо от системы координат, масштаба графика, в котором построены кривые ползучести и др. субъективных факторов.

Проведен анализ большого количества первичных кривых ползучести в широком интервале температур и продолжительностей испытаний /до 100000 часов/, в результате которого установлено, что зависимость значений деформаций начала ускоренной стадии ползучести от напряжения и времени имеет, в общем случае, сложный характер и отличается от зависимости предельной разрушающей деформации от напряжения и времени.

Показано, что метод прогнозирования деформации ползучести необходимо выбирать в зависимости от характера кривой геометрического места точек начала ускоренной стадии ползучести.

8. В зависимости от особенностей материала сопротивляться длительному деформированию до наступления ускоренной стадии ползучести, предложены уравнения состояния эквивалентного повреждения материала при ползучести для одного и нескольких уровней температур.

Показана возможность решения предложенных уравнений состояний методами построения обобщенных диаграмм, аналогично тому, как для решения задач длительной прочности.

Разработанные методы прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести могут быть применены в исследовательских учреждениях, создающих новые жаропрочные материалы и проводящих их высокотемпературные испытания, а также - в проектно-конструкторских организациях, занимающихся проектированием и расчетами деталей и изделий энергетических машин с большими ресурсами эксплуатации.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях автора:

1. Ковпак В.И. Новый метод аппроксимации длительной прочности и ползучести жаропрочных материалов. - Проблемы прочности, 1969, № 6, с. 19-25.

2. Ковпак В.И. Метод экстраполяции длительной прочности жаропрочных материалов. - Проблемы прочности, 1969, № 6, с. 26-29.

3. Ковпак В.И. Анализ некоторых феноменологических зависимостей длительной прочности. - Проблемы прочности, 1970, № 6, с. 17-24.

4. Ковпак В.И. К вопросу прогнозирования ползучести жаропрочных металлов. - Проблемы прочности, 1971, № 4, с. 56-63.

5. Ковпак В.И. О температурно-временной экстраполяции длительной прочности жаропрочных материалов. - Проблемы прочности, 1971, № 7, с. 88-98.

6. Ковпак В.И. О пересчете показателей жаропрочности на различные температуры. - Заводская лаборатория, 1971, № 12, с. 1492-1498.

7. Ковпак В.И., Марусий О.И. Об эквивалентной повреждаемости при испытаниях на длительную прочность. - Проблемы прочности, 1972, № 4, с. 88-46.

8. Ковпак В.И. О температурно-временной экстраполяции дли-

тельной прочности. - Тезисы докладов на Всесоюзном совещании "Физические основы жаропрочности металлических материалов". 20-22 апреля 1971 г., М., Институт металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, с. 19-20.

9. Ковпак В.И., Олисов А.Н. Некоторые особенности ползучести сплавов на никелевой основе. - Проблемы прочности, 1973, № 2, с. 48-53.

10. Ковпак В.И., Цвилюк И.С. О прогнозировании характеристик жаропрочности тугоплавких материалов. - Проблемы прочности, 1973, № 5, с. 50-53.

11. Ковпак В.И. Новые методы температурно-временного прогнозирования характеристик длительной прочности и ползучести на большие сроки службы. Тезисы доклада на "Всесоюзном семинаре по феноменологическим подходам к описанию процессов деформирования и разрушения металлов при высокотемпературном нагружении", 1973 г., г. Киев.

12. Ковпак В.И. Про розвиток методів прогнозування характеристик жароміцності. - Вісник академії наук Української РСР, 1973, № 8, с. 47-54.

13. Ковпак В.И., Цвилюк И.С. Об одном методе прогнозирования ползучести тугоплавких материалов, - Проблемы прочности, 1973, № 9, с. 63-65.

14. Ковпак В.И., Олисов А.Н. О температурно-временном прогнозировании деформации ползучести, - Проблемы прочности, 1973, № 9, с. 28-30.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Научно-техническом совещании по критериям прочности и методам ускоренных испытаний материалов и конструктивных элементов современного машиностроения, г. Киев, 1969 г., 17-19 сентября; на Всесоюзном совещании "Физические основы жаропрочности металлических материалов", г. Москва, 1971 г., 20-22 апреля; на Всесоюзном семинаре по феноменологическим подходам к описанию процессов деформирования и разрушения металлов при высокотемпературном нагружении, г. Киев, 1973, 15-16 мая.

Диссертационная работа в полном объеме докладывалась и обсуждалась на объединенном семинаре Института проблем прочности АН Украинской ССР и кафедры сопротивления материалов Киевского ордена Ленина политехнического института, г. Киев, 1971 г., 18 февраля; 1973 г., 26 апреля.

БФ 00468. Подписано к печати 3.IX.1973 г.
Объем 1,5 печ.л. Заказ 695. Тираж 250
Печатно-множительная лаборатория ин-та "Гипрохиммаш"
г. Киев, бульвар Леон Украинки, 34