

М276158

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

ШАБАЛИНА Наталья Никифоровна

На правах рукописи

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ
СВАРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Специальность 05.04.05 - Технологии и машины
сварочного производства)

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

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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Н.Н. Прохоров

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
М.Х. Шоршоров

кандидат технических наук, доцент
Ф.В. Щубин

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "11" июля 1975 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 года
на заседании Совета Московского ордена Ленина и ордена Трудового
Красного Знамени высшего технического училища им. Н.Э.Баумана по
адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экз. , заверенные печатью,
просим выслать по указанному адресу.

библиотеке МВТУ им.

M276158



1276158

Шабалина Н.Н. Влиян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сварка все более внедряется в производство приборов и изделий высокой точности. К этим изделиям предъявляются требования сохранения формы и размеров с течением времени после сварки. В настоящее время эта проблема решалась в плане анализа и регулирования полиморфных превращений и релаксации остаточных напряжений. Однако, как показано в данной работе, деформирование элементов после сварки стареющих сплавов главным образом определяется дилатацией волокон околосварной зоны при старении после сварочного нагрева ("достаривание"). Приведенный в работе расчетный анализ кинетики образования при сварочном нагреве твердых растворов, кинетики деформационного старения и перестаривания помимо приложений к теории деформирования имеет большое значение применительно к анализу охрупчивания и разупрочнения сплавов при сварке.

Цель исследования. Целью настоящего исследования являлась разработка методов определения кинетики деформирования сваренных элементов из стареющих сплавов и методов математического анализа процессов старения сплавов при сварке, установление зависимостей процессов деформирования после сварки от состава сплавов и условий сварки.

Методы исследования. Исследование кинетики деформирования сваренных элементов производилось экспериментальным путем, для чего был сконструирован и изготовлен многосекционный дилатометр и установка для регистрации прогибов оплавленных по кромке полос. Исследование кинетики деформационного старения и перестаривания производилось методом математического моделирования процессов на ЭВМ.

Научная новизна. Впервые было показано, что знак деформации элементов из стареющих сплавов после сварки в основном определяется знаком дилатации околосварной зоны в процессе старения. Для анализа этих явлений создан многосекционный дилатометр. Впервые проведены расчеты на ЭВМ процессов деформационного старения свариваемых элементов. Эти решения описывают растворение фазовых частиц, генерирование, перепоглощение и аннигиляцию дислокаций, являющихся источниками примесей, явления перестаривания и разупрочнения за счет коагуляции фазовых выделений.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований предложен метод снижения деформаций сваренных элементов из стареющих алюминиевых сплавов, заключающийся в рекомендации сварки спла-

вов, имеющих противоположные знаки дилатации при естественном старении. Даны рекомендации по применению этого метода. Для определения дилатации сплавов при естественном старении создан десятисекционный dilatометр высокой чувствительности и предложена простая, экономичная методика определения прогибов полос при выдержке после сварки в комнатной среде. Разработан расчетный метод оценки процессов, происходящих при сварке, выпущены программы и инструкции по решению следующих задач на ЭВМ: изменения плотности дислокаций, растворения фазовых выделений, развития процессов деформационного старения, коагуляции фазовых выделений.

Апробация работы. Основные разделы работы доложены на семинаре "Повышение эффективности исследований в сварочной науке и технике путем применения математических методов" в г. Киеве в 1973 г., на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" в МВТУ им. Баумана в 1974 г., а также на семинаре отделов института электроосварки им. Е.О.Патона в 1975 г.

Объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы (110 наименований) и содержит 131 страницу, 49 рисунков и 3 таблицы.

ВВЕДЕНИЕ

Во введении показана актуальность работы, ее место в ряду других работ этого направления и в соответствии с поставленной целью сформулированы задачи исследования:

1. Экспериментальное исследование кинетики прогибов оплавленных по кромке полос при выдержке их в комнатной среде.
2. Экспериментальное исследование дилатации сплавов при естественном старении.
3. Расчетный анализ кинетики образования твердых растворов при сварочном нагреве.
4. Расчетный анализ процесса деформационного старения сплавов при сварке.
5. Расчетный анализ процессов перестаривания сплавов при сварке за счет коагуляции мелкодисперсных фазовых выделений.
6. Разработать метод уменьшения деформаций сварочных элементов из стареющих сплавов при выдержке после сварки.

Глава I. ДИЛАТАЦИЯ СТАРЕЮЩИХ СПЛАВОВ

Обсуждены вопросы, относящиеся к установлению знака и величины дилатации при старении сплавов. Обращено внимание на возможность перемены знака дилатации при переходе от процесса образования зов (Г.П.) к процессу фазовых выделений. Изменение общего объема сплава на стадии фазового выделения приблизительно описывается формулой Дюрера. Расчетные методы дилатации сплавов на зонной стадии старения не удовлетворяют практическим потребностям. Вследствие этого точные определения дилатации стареющих сплавов на различных этапах процесса практически возможны только на дилатометрах с большой чувствительностью.

Описана методика определения кинетики дилатации сплавов при естественном старении на сконструированном и изготовленном автором десятисекционным дилатометре (рис. 1), отличающимся высокой чувствительностью (прибор фиксирует дилатацию 0,0005%) и большой производительностью (одновременно можно исследовать до 10 образцов). В работе приведены результаты дилатометрических исследований алюминиевых сплавов К-48; АМг-1; АМг6-2; Д-16; Д-19; В-95 (рис. 2) и малоуглеродистых сталей Ст10; Ст20; Ст3. Перечень сплавов выбран в соответствии с запросами промышленности и необходимости получения характеристик дилатации при старении у сплавов, склонных и не склонных к естественному старению.

Процесс деформирования сваренных элементов из малоуглеродистой стали рассматривался в ряде работ с позиции релаксации внутренних напряжений и распада остаточного аустенита. Для обнаружения влияния процессов старения на этот эффект, нами проделан следующий эксперимент. Дилатация при комнатной температуре определялась после печного нагрева до различных максимальных температур (950°C; 850°C; 750°C; 680°C) и последующего охлаждения в воде. При этом установлено, что нагрев сталей выше A_{c1} приводит к положительной дилатации при его распаде в условиях комнатных температур, ниже A_{c1} приводит к отрицательной дилатации, вероятно, обусловленной старением феррита.

В результате экспериментального исследования влияния скорости охлаждения на кинетику дилатации при естественном старении установлено, что изменение скорости охлаждения может приводить, как в алюминиевых сплавах, так и в малоуглеродистых сталях, к изменению величины дилатации, характера дилатационной кривой и знака дилатации.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ ПОСЛЕ СВАРКИ ПРИ ВЫДЕРЖКЕ В КОМНАТНОЙ СРЕДЕ

Автором предложена простая, экономичная методика определения прогибов оплавленных по кромке полос при выдержке в комнатной среде. Установка для измерения прогибов оплавленных полос позволяет регистрировать минимальное изменение прогиба, равное 0,0005 мм. Результаты исследования кинетики прогибов полос из исследуемых сплавов представлены на рис. 3. Из рисунка следует, что в сплавах различных систем знаки прогибов оплавленных полос различны. Сопоставление рисунков 2 и 3 показывает, что для всех исследованных сплавов знаки прогибов сваренных образцов совпадают со знаками дилатаций волокон в околосварной зоне при естественном старении. Это указывает на определяющую роль фазовой дилатации в деформировании сваренных элементов. Вывод о второстепенной роли процессов релаксации внутренних напряжений можно обосновать тем, что в оплавленных по кромке полосах из алюминиевых сплавов всех систем развиваются растягивающие остаточные напряжения, обуславливающие однозначные прогибы. С целью выявления вклада процессов релаксации остаточных св. рочных напряжений в деформирование полос после сварки были измерены прогибы полос после снятия остаточных напряжений, осуществляемого наложением изгибающего момента, растягивающего оплавляемые волокна во время сварки, а также пластической деформацией оплавленных полос до значений, превышающих деформацию предела текучести.

В результате исследования установлено, что релаксация остаточных напряжений в алюминиевых сплавах не определяет знака дилатации оплавленных волокон при выдержке в комнатной среде после сварки. Процесс релаксации напряжений может даже увеличивать прогибы оплавленных полос, если деформация оплавленных волокон в процессе релаксации совпадает с их деформацией, обусловленной дилатацией при старении, как, например, в сплавах Д-16, Д-19.

Исследован вклад упругого последодействия в деформирование полос, подвергшихся после снятия пластической деформации. Установлено, что вклад упругого последодействия развивается за относительно ничтожный период времени и не оказывает существенного влияния на кинетику фазовой дилатации.

Как указано выше, в сплавах на железной основе деформирование

обусловлено рядом причин. Выявление эффекта старения производилось путем введения в металл шва элементов, обуславливающих разную степень старения (сварка различными электродами, различная степень защиты дуги, легирование шва). Эксперименты показали существенную роль процессов старения и в случае сварки малоуглеродистых сталей.

Глава 3. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ И КИНЕТИКИ СТАРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

Режим сварки оказывает сложное влияние на деформирование сваренных полос вследствие различной степени завершенности процессов образования и распада твердых растворов при различных термомеханических циклах сварки.

Кинетика формирования твердого раствора в случае нагрева пластины линейным источником тепла описывается на основе представления о растворении фазовых частиц (цементита) следующим уравнением:

$$Z^2 = Z_0^2 - 2A_1 \int_0^t \exp\left(\frac{4\pi r_0^2}{\lambda q} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}t}{2a}\right) / K_0 \left(2\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{g}{a}}\right)\right) dt \quad (I)$$

где Z - радиус растворяющейся частицы;

ω - энергия активации диффузии углерода;

A_1 - константа.

В результате решения уравнения (I) на ЭВМ были получены зависимости кинетики растворения частиц в любой точке пластины от условий сварки.

Задача о деформационном старении свариваемых сплавов включала следующие элементы: расч т процесса распространения тепла, расчет процесса пластической деформации, расчет перераспределения плотности дислокаций, расчет процессов диффузии примесей к дислокациям. Тепловая задача решалась нами по уравнениям Н.Н. Рыкалина, деформационная - по алгоритму, оставленному Н.Никол. Прохоровым. Плотность дислокаций (ρ) в матрице при термомеханическом сварочном цикле оценивалась в предположении их генерирования, определяемого соотношением Фриделя, удаления из матрицы за счет процессов аннигиляции и полигонизации. Скорость изменения плотности дислокаций описывалась уравнением:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{8\pi a^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \rho v' \exp\left[\frac{4\pi r_0^2}{\lambda q} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}t}{2a}\right) / K_0 \left(2\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{g}{a}}\right) \right] \quad (2)$$

где δ - лектор Бургерса;
 L - длина свободного пробега дислокаций;
 $\bar{\nu}$ - средняя частота перескоков атомов;
 ϵ - энергия активации миграции точечных дефектов;
 ϵ^p - пластическая компонента внутренних деформаций.

Процесс изменения концентрации примеси (C) в объеме матрицы при деформационном старении описывался уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = (C - C_p) D_0 A \sqrt{\rho} \exp \left[- \frac{U \pi \rho \delta^2}{k T \exp(-\frac{V^2 \tau}{2 \sigma}) H_0 (C \sqrt{\frac{V^2}{4 \sigma^2} + \frac{\epsilon}{k T}})} \right] \quad (3)$$

где A - обобщенный параметр, учитывающий вероятность перескока атома в заданном направлении с учетом силы дрейфа;
 d - межатомное расстояние;
 C_p - равновесная концентрация примеси;
 D_0 - средняя частота колебаний атомов в решетке.

На рисунке 4 представлены циклы изменения компоненты пластической деформации ϵ^p , плотности дислокаций ρ и доли фазовых выделений w применительно к случаю наплавки валика на кромку полос различной жесткости (ширина возрастает в последовательности 1, 2, 3).

На рисунке 5 представлены распределения плотности дислокаций по ширине полос при различной исходной их плотности в определяемых полосах (цифры на кривых).

В различных зонах сварного соединения из упрочняемых сплавов протекают процессы перестаривания, приводящие к разупрочнению, за счет коагуляции мелкодисперсных фазовых выделений. Скорость процесса коагуляции частиц за счет диффузии примесей описана уравнением:

$$\frac{dz}{dt} = A t^m \exp \left[- \frac{U \pi \rho \delta^2}{k T \exp(-\frac{V^2 \tau}{2 \sigma}) H_0 (C \sqrt{\frac{V^2}{4 \sigma^2} + \frac{\epsilon}{k T}})} \right] \quad (4)$$

где z - размер укрупняющейся частицы;
 t - время коагуляции;
 U - энергия активации диффузии элемента, контролирующего процесс коагуляции.

Решение уравнения (4) позволило установить характер роста частицы в зависимости от условий сварки, определить интервал максимальных температур (ΔT), в котором протекают процессы коагуляции. Последнее обстоятельство позволило вывести формулу для инженерных расчетов ширины зоны разупрочнения:

$$\Delta y = \frac{q}{\sqrt{2\pi e} \sqrt{\delta c k}} \cdot \frac{\Delta T}{T'_{max} \cdot T''_{max}} \quad (5)$$

В работе О.А. Бакши дано решение задачи о влиянии ширины мягкой прослойки на степень разупрочнения сварного соединения. Формула (5) в сочетании с уравнением Бакши дает возможность рассчитывать прочность сварного соединения в зависимости от режима сварки и свойств свариваемых сплавов.

На рис. 6 представлена кинетика роста частиц (сплошные линии) при различном тепловложении (тепловложение возрастает в последовательности 1, 2, 3). Штрихпунктирными линиями показаны термические циклы.

Глава 4. МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОСЛЕ СВАРКИ В СТАРЕЮЩИХ СПЛАВАХ

Проведен анализ существующих методов устранения деформаций сварных элементов при выдержке их после сварки. Сущность рассмотренных методов сводится к получению стабильных структур и уменьшению остаточных сварочных напряжений с целью уменьшения процессов релаксации.

Однако, в данной работе показано, что основным фактором, влияющим на деформирование сваренных элементов из стареющих алюминиевых сплавов, является "достаривание" околошовной зоны после сварки. В работе также показано, что сплавы различных систем имеют разные знаки дилатации при естественном старении.

На основе вышесказанного нами был разработан метод уменьшения деформаций после сварки из стареющих алюминиевых сплавов. Метод заключается в рекомендации сварки сплавов, имеющих противоположные знаки дилатации при естественном старении. Выбор осуществляется из числа рекомендованных для сварки в отечественной промышленности сплавов. Для определения дилатации могут быть использованы высокочувствительные dilatометры различных систем, а также высокопроизводительный dilatометр, разработанный автором.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что дилатация в локах шва и оклошовной зоны в процессе "достаривания" после сварки является основным фактором, определяющим знак и величину деформаций сваренных элементов из стареющих алюминиевых сплавов.

2. Для анализа влияния процессов старения на деформирование сваренных элементов создан многосекционный дилатометр, регистрирующий минимальную деформацию сплавов при естественном старении, равную 0,0005% и предложена экономичная методика определения прогибов сваренных элементов. Эти методы и приборы применяются в ЛТТ МВТУ им. Н.Э.Баумана, МЭММ для исследования старения сваренных элементов.

3. Показано, что процесс релаксации остаточных сварочных напряжений в стареющих алюминиевых сплавах при их выдержке в комнатной среде может как *уменьшать* деформацию сваренных элементов (сплавы системы $Al-Zn-Mg$, $Al-Zn-Mg-Cu$), так и *увеличивать* ее (сплавы системы $Al-Cu-Mg$).

4. Установлено, что знак деформирования сваренных полос из малоуглеродистых сталей определяется влиянием двух факторов: дилатацией волокон оклошовной зоны за счет распада остаточного аустенита и дилатацией за счет старения феррита. В этих условиях изменение режима сварки и состава металла шва может привести к изменению знака прогиба.

5. Ввиду того, что "достаривание" сплавов при выдержке в комнатной среде определяется незавершенностью этих процессов при сварке, т.е. кинетикой их развития, разработан метод математического анализа процесса деформационного старения при сварке.

6. С этой целью создана математическая модель и проведено решение задачи о кинетике образования твердых растворов в зависимости от условий сварки и свойств, а также начального состояния свариваемых сплавов.

7. Решена задача о перераспределении плотности дислокаций в свариваемых сплавах. Получено качественное совпадение расчетных данных с экспериментальными исследованиями, проведенными В.Б.Малевским, В.Б.Гайдаренко, а также В.Ф.Дрченко, А.Л.Сотниченко и др. Решение задачи о распределении плотности дислокаций позволило ввести количественные представления о степени наклепа и возврата различных зон свариваемого металла в условиях сварки.

8. Решена задача о развитии деформационного старения свариваемых сплавов. Это создает основу для анализа явлений деформирования элементов после сварки стареющих сплавов и установления взаимосвязи между условиями сварки и указанными выше явлениями.

9. Решена задача о перестаривании свариваемых сплавов, т.е. задача о коагуляции дисперсных выделений. Показано, что кинетика коагуляции частиц при сварке определяется S-образной кривой с точкой перегиба, лежащей на ветви охлаждения термического цикла сварки.

10. Установлено, что коагуляция частиц и разупрочнение сварных соединений наблюдается в некотором интервале температур, определяемом диффузионной подвижностью атомов, входящих в состав карбидов. Показано, что этот интервал существенно не зависит от режима сварки. Получена формула для расчета ширины зоны разупрочнения за счет коагуляции фазовых выделений применительно к различным режимам сварки и свойствам сплавов.

11. Предложен метод снижения деформаций сварных элементов при их выдержке после сварки, учитывающий вклад дилатации при старении в деформирование. Метод заключается в рекомендации сварки сплавов, имеющих противоположные знаки дилатации при старении. Выбор осуществляется из числа разнородных алюминиевых сплавов, применяемых для сварки в отечественной промышленности.

12. На основании проведенной работы выпущены инструкции по решению задач на ЭВМ, описывающих следующие процессы, происходящие в оплаиваемых по кромке полосах:

- изменение плотности дислокаций (наклеп, возврат);
- растворение фазовых выделений и образование твердых растворов;
- развитие процессов деформационного старения;
- коагуляция фазовых выделений (перестаривание, отпуск).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Прохоров Н.Н., Майкова Л.П., Шабалина Н.Н. "Влияние жесткости свариваемых элементов на процессы развития деформаций и напруг в сплавах на основе никеля, алюминия, титана и железа. ЦНИИ "Цветметинформация", ДПИ, Р.Л., вып. 63, "Сварка", № 11, реф. 11.63.110, 1972.

2. Прохоров Н.Никол., Шабалина Н.Н. Влияние режима сварки на развитие напряжений и деформаций в свариваемых сплавах на различной основе. ЦНИИ "Цветметинформация", ДЭП, Р.Ж., вып. 63 "Сварка", № 3, реф. 3.63.91, 1973.

3. Прохоров Н.Н., Шабалина Н.Н. Расчет на ЭВМ кинетики термического старения свариваемых сплавов. Сб. "Повышение эффективности исследований в сварочной науке и технике путем применения математических методов". Киев, 1973.

4. Прохоров Н.Н., Шабалина Н.Н. Влияние старения на деформацию сваренных полос. Сб. "Тезисы докладов III Закавказской научно-технической конференции по внедрению в производство новой сварочной техники", Тбилиси, 1974.

5. Прохоров Н.Н., Шабалина Н.Н. Перераспределение концентрации дислокаций в околошовной зоне свариваемых металлов. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1975, № 2.

6. Прохоров Н.Н., Шабалина Н.Н. Расчет процесса растворения частиц при сварке и подобных ей операциях. "Физика и химия обработки материалов", 1975, № 2.

7. Прохоров Н.Н., Шабалина Н.Н. Термическое старение сплавов при сварке. "Физика и химия обработки материалов", 1975, № 3.

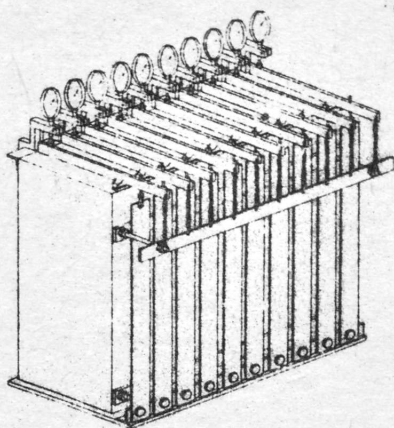


Рис 1.
Многосекционный дила-
тометр.

Рис 2.
Кинетика дилатации алюминиевых
полос при естественном старе-
нии после закалки в воду с
температур гомогенизации.
 $H=50\text{мм}$.

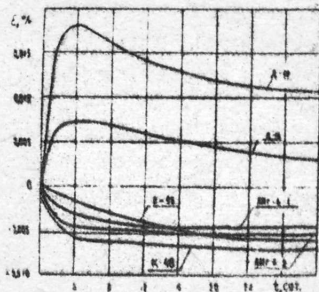
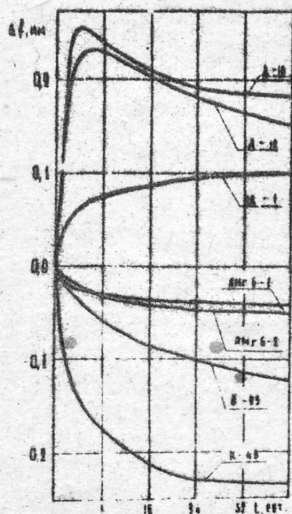


Рис 3.
Кинетика прогибов алюминиевых
полос после наплавки валика на
кромку при их выдержке в комнат-
ной среде. $H=30\text{мм}$.

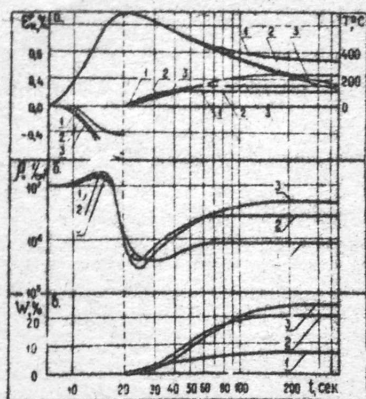


Рис 4.

Зависимости а) температуры T , пластической деформации ϵ_p , б) плотности дислокаций ρ , в) доли фазовых выделений W от времени применительно к пластинам из малоуглеродистой стали различной ширины H , см: 1-4; 2-8; 3-12. $q/\sqrt{s} = 2096 \text{ кал/см}^2$. Шкала времени нанесена при условии размещения источника тепла в момент $t = 10$ сек.

Рис 5.

Распределение остаточной плотности дислокаций в околосшовной зоне пластины из малоуглеродистой стали. Режим проплавки: $q = 1132 \text{ кал/сек}$, $V = 0,27 \text{ см/сек}$, $g = 1 \text{ см}$, $H = 8 \text{ см}$. Цифры на кривых указывают различную исходную плотность дислокаций.

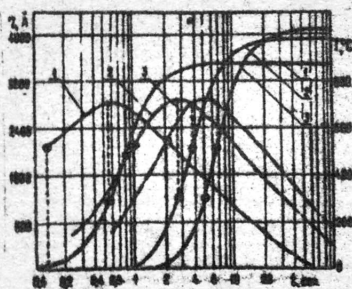
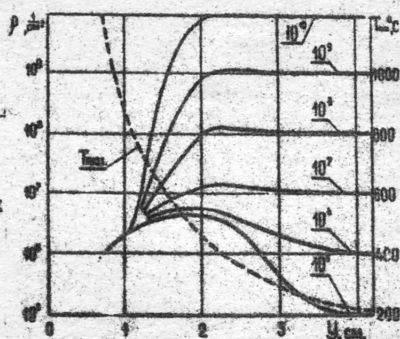


Рис 6.

Термические циклы и приращения радиусов карбидов при сварке пластины в условиях различного тепловложения $q/\sqrt{s}$, ккал/см^2 : 1-1050, 2-2300, 3-3200.
 - - - - - кривые термических циклов;
 — кривые роста карбидов.