

5.16.01  
58

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ПОПОВА Татьяна Александровна

УДК 669.1.017

ФОРМИРОВАНИЕ МЕЛКОГО ЗЕРНА АУСТЕНИТА И ЕГО  
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ

Специальность 05.16.01 – Металловедение  
и термическая обработка металлов

Автореферат  
диссертации на соискание учёной  
степени кандидата технических  
наук

Челябинск  
1984

Работа выполнена на кафедре металловедения и термической обработки Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
ИТВИНБЕРГ М.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
ГОЛДЕНТВИН Я.Е.,  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник МИНЦ И.И.

Ведущее предприятие - ЧЕЛЯБИЭНЕРГО

Защита состоится "23" мая 1984 г. на заседании специализированного совета К 053.Г3.03 по присуждению учёных степеней кандидата технических наук металлургического факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола по адресу: 454044, г.Челябинск, пр.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "20" апреля 1984 г.

Учёный секретарь специализированного совета, доцент,

канд. техн. наук



О.К. ТОКОВОЙ

**А к т у а л ь н о с т ь т е м ы .** Измельчение зерна аустенита является одним из эффективных путей повышения конструктивной прочности машиностроительных сталей. Поэтому работы, направленные на изучение условий получения мелкого зерна и его устойчивости при выдержке в надкритическом интервале температур, являются актуальными и представляют интерес для теории и практики термической обработки сталей.

#### **Ц е л ь р а б о т ы**

1. В среднеуглеродистых сталях изучить влияние исходной структуры и скорости нагрева на формирование при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении мелкого зерна аустенита и на кинетику его роста при последующей выдержке при различных температурах надкритического интервала.

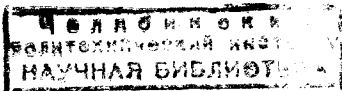
2. Разработать методику и аппаратуру для изучения структурной перекристаллизации стали при нагреве с заданными скоростями, позволяющую моделировать производственные режимы нагрева, от реализуемых при печном нагреве до нагрева токами высокой частоты.

#### **Н а у ч н а я н о в и з н а р а б о т ы**

1. Установлено, что влияние исходной структуры на размер зерна аустенита, формирующегося при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении, наиболее значительно проявляется при нагреве со скоростями 0,5...5 °C/с. При нагреве с малыми скоростями (0,1 °C/с и меньше) и высокими скоростями (выше 40 °C/с) размер начального аустенитного зерна практически не зависит от исходной структуры стали.

2. Отпуск в температурном интервале развития обратимой и необратимой хрупкости оказывает влияние на размер зерна аустенита, образующегося при нагреве, при условии заметное восприимчивости стали к этим видам хрупкости. Чем значительнее степень охрупчивания стали при отпуске, тем крупнее зерно аустенита, формирующееся при последующем  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении. Влияние предварительного отпуска в температурном интервале развития обратимой хрупкости на начальный размер зерна аустенита является обратным, а в интервале необратимой хрупкости - необратимым.

3. Собирательная рекристаллизация прекращается, когда устанавливается определённое распределение зёрен по размеру: распределение десятичных логарифмов диаметров зёрен является нормальным с дисперсией  $\sigma^2 = 0,0116$ . Устойчивость мелкозернистой



структуры аустенита против собирательного роста тем меньше, чем больше степень отклонения начального распределения зерна по размеру от "устойчивого". Установлена зависимость начального распределения зёрен аустенита по размеру от исходной структуры и скорости нагрева.

4. Существует критическая скорость нагрева, превышение которой резко ускоряет изотермический рост зерна аустенита. При нагреве со скоростями выше критического значения в фазонаклёпанном аустените при выдержке развивается первичная рекристаллизация, по структурным особенностям аналогичная рекристаллизации после критической степени деформации.

#### Практическая ценность

1. Определены условия получения при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении мелко-го и устойчивого против изотермического роста зерна аустенита в конструкционных сталях, не легированных специальными модифицирующими добавками.

2. Разработаны конкретные режимы скоростной закалки с использованием печного нагрева и непрерывно-последовательного нагрева ТВЧ спецстали.

3. Создана установка и разработана методика для изучения структурной перекристаллизации стали при нагреве с заданными скоростями от 0,01 до 300 °C/с.

Реализация работы в промышленности. Разработанные режимы скоростной закалки спецстали внедрены в производство на ряде предприятий, что позволило за счёт улучшения качества металла и повышения производительности труда получить общий экономический эффект 102 тыс. рублей в год.

#### На защиту выносятся

1. Зависимость размера зерна аустенита, формирующегося при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении, от исходной структуры стали и скорости нагрева.

2. Связь условий получения мелкого зерна аустенита при нагреве и устойчивости его против роста при изотермической выдержке.

3. Методика и конструкция установки для исследования структурной перекристаллизации стали при нагреве с заданными скоростями.

**А п р о б а ц и я р а б о т ы** . Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Новое в металлловедении и термообработке конструкционных сталей и специальных сплавов" (Челябинск, 1978 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Металловедческие резервы повышения качества металлопродукции, надёжности и долговечности деталей машин" (Челябинск, 1981 г.), отраслевом семинаре "Наука - производству" (Свердловск, 1981 г.), I и II научно-технических конференциях молодых учёных и специалистов ЧПИ (Челябинск, 1977, 1979 г.г.), научно-технических конференциях ЧПИ (Челябинск, 1976...1983 г.г.).

**П у б л и к а ц и и** . По теме диссертации опубликовано 8 работ.

**О б ъ ё м р а б о т ы** . Диссертационная работа изложена на 89 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 13 таблиц, список литературы из 153 наименований на 16 страницах и приложение на 2 страницах.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка цитируемой литературы.

В о в в е д е н и и обоснована актуальность темы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

П е р в а я г л а в а диссертации посвящена обзору литературы, в котором рассмотрены закономерности образования аустенита в стали, способы измельчения аустенитного зерна и его влияние на механические свойства стали. Обсуждается влияние величины зерна на перлитную и бейнитную прокаливаемость стали.

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи настоящего исследования.

В о в т о р о й г л а в е приведены составы исследованных сталей 30, 30ХГСА, 40ХНМА и 27СГМ и методика эксперимента. Пластинчатые образцы размерами 40x4x0,8 мм нагревали в вакуумной камере прямым пропусканием электрического тока. Температура нагрева образца и равномерность её распределения определяются по показаниям тонких приваренных к образцу хромель-алюмелевых термопар. Показания термопар записывали на шлейфовый осциллограф. Скорость электронгрева образца связана со ско-

Таблица  
Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Содержание легирующих элементов, % вес.							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	O	N
30ХГСА	0,29	1,00	0,9	1,00	0,4	-	0,015	0,009
40ХНМА	0,42	0,20	0,7	0,80	1,5	0,2	0,011	0,014
27СГМ	0,25	1,40	1,2	0,30	0,4	0,2	0,018	0,007
30	0,30	0,22	0,7	0,25	-	-	-	-

ростью увеличения напряжения (тока), подаваемого на образец. Величину последней регулировали изменением скорости вращения движка автотрансформатора. При заданной скорости увеличения напряжения скорость нагрева образца зависит от размера образца, электросопротивления и теплоотвода контактов. Эти факторы невозможно достаточно точно воспроизводить при переходе от одного образца к другому, в результате чего при данной скорости увеличения напряжения скорость нагрева для разных образцов может меняться на

50%. В работе предложен метод компенсации влияния указанных переменных факторов, суть которого заключается в следующем. Вначале на образце устанавливает заданную условную скорость нагрева: без подачи напряжения на образец движок автотрансформатора, в цепь которого включен образец, прокручивали от нулевого положения с заданной скоростью  $V_8$  в течение заданного отрезка времени  $\tau_8$ , после чего образец при неизменном положении движка автотрансформатора нагревали до заданной температуры  $T_n \approx 200^\circ\text{C}$  путём изменения напряжения, подаваемого на автотрансформатор. Данной совокупности  $T_n, V_8, \tau_8$  отвечает определённая скорость нагрева в заданном температурном интервале (в области невысоких скоростей нагрева  $0,01 \dots 10^\circ\text{C}/\text{с}$  относительная погрешность воспроизведения заданной скорости нагрева 0,5%, а при скоростях  $200 \dots 300^\circ\text{C}/\text{с}$  - 3%).

Для выявления зёрненной структуры аустенита разработана методика окислительного травления образцов струёй воздуха. Зерно аустенита выявляется непосредственно в аустенитном состоянии и за очень короткий промежуток времени 0,1 с.

Различие кривых распределения диаметров сечений зёрен аустенита по данным окислительного травления поверхности и химического травления внутренних объёмов одних и тех же образцов не превышает различия хода кривых, построенных только по данным химического травления, следовательно, зёрненная структура, выявленная окислительным травлением поверхности, характеризует внутренние объёмы металла. Структурные исследования проводили на участке образца вблизи места приварки термопары с помощью оптического микроскопа "Neophot" и электронного микроскопа "ЭММА-2".

В третьей главе рассмотрено влияние скорости нагрева от 0,1 до  $200^\circ\text{C}/\text{с}$  на размер зерна аустенита, формирующегося при фазовой перекристаллизации в сталях с различными исход-

ними структурными состояниями: закалки; низкого и высокого отпуска; изотермического распада переохлажденного аустенита в I и II ступенях.

Для всех исходных структур стали повышение скорости нагрева в указанных пределах приводит к уменьшению размера начального зерна аустенита в 3...5 раз. Значительное измельчение начального зерна (в 3...4 раза) наблюдается уже при увеличении скорости нагрева от 0,1 до 2...5 °C/с, то есть при таких скоростях, которые достижимы в цеховых условиях при печном нагреве. Увеличение скорости нагрева от 20 до 200 °C/с практически не изменяет размер начального зерна аустенита.

Структурные особенности образования аустенита при различных скоростях нагрева изучены на стали 27CrM с исходной структурой сорбит отпуска. При малой скорости нагрева (0,1 °C/с) превращение развивается, в основном, путём роста относительно небольшого числа зародышей аустенита, возникших на малоугловых границах феррита в начале межкритического интервала  $A_{c1} \dots A_{c2}$ . По мере повышения температуры нагрева новые зародыши аустенита не возникают. Из общего числа растущих аустенитных участков группы с близкой кристаллографической ориентировкой при столкновении "сливаются", образуя одно зерно. Всё это приводит к формированию относительно крупного среднего размера зерна аустенита. При скоростях нагрева ~5 °C/с, кроме образования аустенитных участков на малоугловых границах феррита, наблюдается дополнительное зарождение аустенита на большеугловых границах и внутри фрагментов феррита. В отличие от нагрева со скоростью 0,1 °C/с при повышении температуры нагрева в межкритическом интервале  $A_{c1} \dots A_{c2}$  превращение развивается как ростом ранее образовавшихся зародышей, так и образованием новых. Коалесценция получает значительно меньшее развитие вследствие того, что участки аустенита, возникшие на различных элементах структуры, имеют разную кристаллографическую ориентировку. Также меньшее развитие получают процессы собирательной рекристаллизации. Это обеспечивает получение значительно более мелкого зерна аустенита. Увеличение скорости нагрева от 5 до 20 °C/с не приводит к существенному увеличению числа мест зарождения аустенита, и некоторое уменьшение размера начального зерна связано, в основном, с ослаблением развития собирательной рекристаллизации.



При медленном нагреве ( $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ ) размер начального зерна аустенита не зависит от исходной структуры. Повышение скорости нагрева до  $0,5 \dots 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$  приводит к резкому усилению зависимости размера начального зерна аустенита от исходной структуры (величина начального зерна аустенита для различных исходных структур может отличаться более, чем в 2 раза). По мере дальнейшего увеличения скорости нагрева выше  $5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$  влияние исходной структуры на начальный размер зерна ослабевает и при скоростях нагрева  $40 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$  и выше для исходной мартенситной структуры, структур отпуска и изотермического распада переохлаждённого аустенита формируется близкое по размеру зерно аустенита; при высоких скоростях нагрева (выше  $40 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ ) начальное зерно аустенита близко по размеру для всех исследованных сталей и исходных структур ( $5 \dots 7,5 \text{ мкм}$ ).

Установленные закономерности имеют практическое значение. Если сталь нагревают с относительно высокими скоростями (выше  $40 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ ), то специальная подготовка исходной микроструктуры с целью получения более мелкого зерна аустенита, формирующегося при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении, мало эффективна. Если же имеет место печной нагрев со скоростями в интервале  $0,5 \dots 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ , то для получения более дисперсной зёрненной структуры аустенита необходимо принимать во внимание исходную структуру стали.

В четвёртой главе рассмотрено влияние исходного размера зерна аустенита, температуры предварительного отпуска и температуры изотермического распада переохлаждённого аустенита на размер зерна аустенита, формирующегося при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении.

Для количественной оценки склонности сталей к структурной перекристаллизации ввели коэффициент измельчения  $K_{из} = d_{ис} / d_n$  который показывает во сколько раз размер начального зерна аустенита  $d_n$  стал меньше по сравнению с исходным размером зерна аустенита  $d_{ис}$ . Зависимость коэффициента измельчения от размера исходного зерна в исследованном интервале  $d_{ис}$  (от 6 до 70 мкм) является линейной; её конкретный ход зависит от химического состава стали, скорости нагрева и температуры предварительного отпуска. С уменьшением величины исходного зерна аустенита значения  $K_{из}$  уменьшаются и при пересечении прямой  $K_{из} = f(d_{ис})$  с горизонталью  $K_{из} = 1$  получаем значение  $d_{ис}$ , которое равно

предельно мелкому начальному зерну аустенита для выбранного сочетания исходной структуры стали и скорости нагрева. Показано, что значение предельно мелкого зерна аустенита ( $d_{np}$ ) является количественным показателем предельной возможности измельчения зёрненной структуры аустенита за счёт фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации стали данного химического состава для конкретных исходной структуры и скорости нагрева. Данные по значениям коэффициента измельчения, полученные на образцах с разным по величине исходным зерном аустенита, и данные, полученные на одном образце, в котором  $d_{ис}$  последовательно уменьшали путём многократного повторения циклов фазовой перекристаллизации при заданных режимах предварительного отпуска и последующего нагрева, укладываются на одну зависимость  $K_{из} = f(d_{ис})$ . Следовательно, по данным  $K_{из} = f(d_{ис})$  можно задавать режимы циклических обработок, обеспечивающих получение требуемой дисперсности зёрненной структуры аустенита. При скоростях нагрева 0,5...5 °С/с величина  $d_{np}$  может изменяться в широких пределах в зависимости от исходной микроструктуры стали и скорости нагрева. Из полученных данных следует, что при  $\alpha \rightarrow \gamma$  переходе зерно аустенита может не только измельчаться, но и укрупняться; для данной исходной микроструктуры и скорости нагрева в случаях  $K_{из} < 1$  и  $K_{из} > 1$  в результате многократного повторения циклов фазовой перекристаллизации зерно аустенита стремится к одному и тому же пределу  $d_{np}$ , но в первом случае зерно укрупняется, а во втором - измельчается. При скоростях нагрева 40...200 °С/с независимо от размера исходного зерна и исходной микроструктуры начальный размер зерна оказывается практически одинаковым (5...7 мкм).

Установлено, что предварительные обработки стали, усиливающие степень развития отпускной хрупкости, приводят к получению более крупного зерна аустенита при нагреве. Влияние на начальный размер зерна аустенита предварительного отпуска в температурном интервале развития обратимой хрупкости обратимо, а в интервале необратимой хрупкости - необратимо, подобно влиянию отпуска на ударную вязкость. Это позволяет предполагать, что процессы, приводящие к охрупчиванию стали при отпуске, ответственны за укрупнение начального зерна аустенита. Если при отпуске процессы охрупчивания не получают существенного развития, то повышение

температуры предварительного отпуска до  $\sim 650^{\circ}\text{C}$  практически не оказывает влияния на начальный размер зерна аустенита; отпуск при температурах выше  $\sim 650^{\circ}\text{C}$  приводит к получению несколько меньшего размера начального зерна аустенита. В случае исходной бейнитной структуры начальный размер зерна аустенита практически такой же, как и для мартенситной исходной структуры. Более мелкое зерно аустенита при нагреве стали ( $\sim$  в 1,5 раза) получается при исходной сменной бейнитно-мартенситной структуре. В этом случае образование аустенита раньше по температуре начинается и заканчивается в мартенситных участках. Участки бейнита, пересекающие исходное зерно аустенита, ограничивают рост участков аустенита в двухфазной области и этим способствуют получению более мелкого начального зерна. Кроме того, появляющаяся поверхность раздела бейнит-мартенсит увеличивает общее число мест предпочтительного образования зародышей аустенита, что также ведёт к измельчению начального зерна. При исходной феррито-перлитной структуре стали наиболее мелкое зерно аустенита формируется при нагреве стали с выделениями феррита в форме видманштетта.

В пятой главе рассмотрены характер и причины влияния условий получения мелкого зерна аустенита (исходной структуры стали и скорости нагрева) на кинетику его роста при выдержке в надкритическом интервале температур. Предварительные обработки исследованных сталей (горячая пластическая деформация, предварительный перегрев до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) ослабляют влияние примесных фаз на рекристаллизационную способность аустенита. Зависимость устойчивости мелкого зерна аустенита от исходной структуры стали и скорости нагрева обусловлена, главным образом, воздействием указанных факторов на кинетические и структурные особенности  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, на количество и дисперсность частиц неразстворённой карбидной фазы.

Показано, что близкое по размеру зерно аустенита, но полученное при разных исходных структурах и скоростях нагрева, может иметь существенно отличную склонность к росту в изотермических условиях. Так, например, в стали 27CrM с исходной структурой сорбита отпуска при нагреве со скоростями 20 и  $100^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $960^{\circ}\text{C}$  зерно аустенита имеет практически одинаковый размер  $\sim 7$  мкм, а после двухчасовой выдержки при этой температуре в случае нагрева

со скоростью 20 °C/с зерно аустенита 20 мкм, а для 100 °C/с - - 90 мкм. Влияние исходной структуры и скорости нагрева на кинетику изотермического роста зерна проявляется в большей мере в начальный период выдержки.

При последовательном повышении скорости нагрева до температуры выдержки наблюдается резкое ускорение изотермического роста зерна аустенита при превышении некоторого критического значения скорости нагрева. С повышением температуры выдержки значение критической скорости нагрева уменьшается. Обнаружено, что при нагреве со скоростями выше критической при изотермической выдержке в фазонакляпанном аустените развивается первичная рекристаллизация, по структурным особенностям аналогичная рекристаллизации после критической степени деформации. Этот фактор является главной причиной низкой устойчивости мелкого зерна аустенита против роста при выдержке в случае нагрева со скоростями выше критической скорости. При нагреве до температуры изотермы со скоростями ниже критического значения возможно сохранение при выдержке мелкого зерна аустенита, полученного при  $\alpha-\gamma$  превращении. При этом исходная структура стали и скорость нагрева определяют склонность зерна аустенита к росту посредством влияния указанных факторов на начальное распределение зёрен аустенита по размеру и степень растворения карбидной фазы при нагреве. При прочих одинаковых условиях наибольшую устойчивость против роста имеет зерно аустенита, полученное при нагреве стали с исходной мартенситной структурой.

Установлено, что в ходе собирательной рекристаллизации зёрненная структура аустенита преобразуется таким образом, что к моменту стабилизации среднего размера зерна аустенита устанавливается нормальное распределение десятичных логарифмов диаметров зёрен. Существенно новым является следующий результат: при образовании относительно устойчивой против собирательного роста зёрненной структуры распределение десятичных логарифмов диаметров зёрен подчиняется не просто нормальному закону, а независимо от среднего размера зерна и предварительной обработки стали устанавливается распределение, характеризующееся одной и той же дисперсией  $\sigma^2 = 0,0116$ . Если в аустените развивается только собирательная рекристаллизация, то чем значительнее отклонение началь-

ного распределения зёрен по диаметру от выявленного "устойчивого", тем больше склонность зерна аустенита к собирательному росту и крупнее конечное зерно, достигаемое при выдержке. Получению уже при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении распределения зёрен по размеру, близкому к логарифмически нормальному с дисперсией  $\sigma^2 = 0,0116$ , способствует более однородная исходная структура стали и повышение скорости нагрева (сужение интервала  $A_{c1} \dots A_{c3}$ ). Так, в стали 27СГМ в случае исходной мартенситной структуры "устойчивая" зёрненная структура формируется при нагреве со скоростью  $5^\circ\text{C}/\text{с}$ , а в случае исходной структуры высокого отпуска ( $650^\circ\text{C}$ , 8 ч) необходимо повышение скорости нагрева до  $20^\circ\text{C}/\text{с}$ . В стали с исходной феррито-карбидной структурой при неполном растворении карбидной фазы при нагреве при изотермической выдержке в период дорастворения карбидных частиц, сдерживающих собирательный рост зерна, может развиваться вторичная рекристаллизация. Это при прочих равных условиях приводит к уменьшению устойчивости мелкого зерна аустенита.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и создана установка для исследования структурной перекристаллизации сталей при нагреве с заданными скоростями, что позволяет моделировать производственные режимы нагрева, от реализуемых при печном нагреве до нагрева токами высокой частоты (скорости нагрева от  $0,01$  до  $300^\circ\text{C}/\text{с}$ ).

2. Размер зерна аустенита, формирующегося при фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации, и кинетика его роста при последующей изотермической выдержке зависят различным образом от исходного структурного состояния стали и скорости нагрева. Равное по размеру начальное зерно аустенита, но полученное при разных условиях, может обладать существенно различной устойчивостью против роста.

3. Наиболее значительное (в  $3 \dots 5$  раз) измельчение зёрненной структуры аустенита стали в результате  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения наблюдается при повышении скорости нагрева в области невысоких значений - от  $0,1$  до  $5^\circ\text{C}/\text{с}$ . При дальнейшем увеличении скорости нагрева интенсивность измельчения зерна ослабевает и для интервала скоростей нагрева  $20 \dots 200^\circ\text{C}$  начальный размер зерна аустенита

практически одинаков. Иное влияние скорость нагрева оказывает на кинетику изотермического роста зерна: существует некоторая критическая скорость нагрева, при превышении которой резко ускоряется рост зерна. Значение критической скорости уменьшается с повышением температуры выдержки. При скоростях нагрева меньше критической увеличение скорости нагрева приводит одновременно к уменьшению как начального, так и конечного размера зерна аустенита, достигаемого при выдержке.

4. Влияние исходной структуры стали и скорости нагрева на начальный размер зерна аустенита сводится к изменению числа мест зарождения аустенита и интенсивности развития процессов собирательной рекристаллизации в межкритическом интервале. Кинетика изотермического роста зерна аустенита зависит от исходной структуры стали и скорости нагрева до температуры выдержки через влияние этих факторов на начальное распределение зёрен по размеру, степень фазового наклёпа аустенита, полноту растворения карбидной фазы.

5. Исходная перед нагревом структура стали оказывает наиболее значительное влияние на размер зерна аустенита, формирующегося при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении, в интервале скоростей нагрева 0,5...5 °C/с. Вне этого интервала влияние исходной структуры на начальный размер зерна аустенита ослабляется и при малых (0,1 °C/с) и больших (40 °C/с и выше) скоростях нагрева размер начального зерна аустенита практически не зависит от исходной перед нагревом структуры. Зависимость кинетики изотермического роста зерна аустенита от исходной структуры в значительной мере проявляется только при скоростях нагрева ниже критической скорости; в общем случае значение критической скорости не совпадает с интервалом скоростей нагрева 0,5...5 °C/с.

6. Процессы, приводящие к необратимому и обратимому охрупчиванию стали при отпуске, оказывают влияние и на начальный размер зерна аустенита, образующегося при последующем нагреве. Предварительные обработки стали, усиливавшие степень развития того или иного вида хрупкости, приводят к формированию более крупного зерна аустенита. По сравнению с исходной мартенситной структурой стали формирование более мелкого зерна аустенита при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении наблюдается при исходных смешанной бейнитно-мартенситной

и видманштеттовой структурах, а также структуре высокого отпуска (выше  $650^{\circ}\text{C}$ ), проводимого по режиму, исключающему развитие обратимой отпускной хрупкости.

7. При проведении циклической термообработки стали, включающей многократное повторение циклов фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации, размер предельно мелкого зерна аустенита, достигаемый после 3...5 циклов обработки, в значительной мере зависит от исходной перед нагревом структуры стали только при скоростях нагрева  $0,5 \dots 5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Измельчение зерна аустенита при термоциклировании усиливается с повышением скорости нагрева до  $\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а при больших скоростях нагрева предельно мелкое зерно аустенита практически не зависит от используемой скорости нагрева.

8. Причина аномально низкой устойчивости мелкого зерна аустенита, образующегося при нагреве со скоростями выше критической скорости, связана с развитием в фазонаклёпанном аустените первичной рекристаллизации, по структурным особенностям аналогичной рекристаллизации после критической степени деформации.

9. Установлено, что при нагреве до температуры выдержки со скоростями меньше критического значения, собирательный рост зерна аустенита практически прекращается, если устанавливается логарифмически нормальное распределение зёрен по диаметру, характеризующееся независимо от среднего размера зерна и предварительной обработки стали одной и той же дисперсией -  $\sigma^2 = 0,0116$ . Чем ближе начальное распределение зёрен по размеру к логарифмически нормальному с дисперсией  $0,0116$ , тем менее склонно зерно аустенита к собирательной рекристаллизации. Формированию в результате  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации "устойчивой" зёрненной структуры способствует исходная структура стали и скорость нагрева, при которых зародыши аустенита образуются более равномерно по объёму, а температурный интервал фазового перехода - уже.

10. При неполном растворении карбидной фазы при нагреве в период дорастворения карбидных частиц при изотермической выдержке может развиваться вторичная рекристаллизация, что при прочих равных условиях приводит к уменьшению устойчивости мелкого зерна аустенита против роста.

11. Наиболее полное сохранение при изотермической выдержке мелкого зерна аустенита, полученного при фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекрис-

таллизиции, возможно только при скоростях нагрева, не превышающих критического значения. При выполнении указанного условия используются исходная структура и скорость нагрева должны обеспечить получение начального распределения зёрен по размеру, близкого к логарифмическому нормальному с дисперсией  $\sigma^2 = 0,0116$ , а также отсутствие в начальной структуре аустенита нерастворённых частиц цементита в количестве, достаточном для инициирования вторичной рекристаллизации в период их дорастворения при изотермической выдержке.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Морозов О.П. и др. О фазовой и структурной перекристаллизации в некоторых конструкционных сталях /О.П.Морозов, М.М.Штейнберг, Т.А.Попова.- В кн.: Вопросы производства и обработки стали. Тематич.сб.научн.трудов.- Челябинск: ЧПИ, 1979, с.99-102.
2. Морозов О.П., Попова Т.А. Анализ устойчивости мелкозернистой структуры аустенита, формирующегося при фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации.- В кн.: Вопросы производства и обработки стали. Тематич.сб.научн.трудов.- Челябинск: ЧПИ, 1981, с.86-93.
3. Морозов О.П. и др. Исследование связи размера зерна аустенита с условиями нагрева стали 27СГМ /О.П.Морозов, М.М.Штейнберг, Т.А.Попова, Л.А.Кирель.- В кн.: Вопросы производства и обработки стали. Тематич.сб.научн.трудов.- Челябинск: ЧПИ, 1980, с.108-117.
4. Штейнберг М.М. и др. Влияние температурно-временных условий нагрева конструкционных сталей на размер зерна аустенита /М.М.Штейнберг, О.П.Морозов, Т.А.Попова, Л.А.Кирель.- В кн.: Вопросы производства и обработки стали. Тематич.сб.науч.трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1978, с.117-124.
5. Морозов О.П., Попова Т.А. Методика исследования структурной перекристаллизации сталей при нагреве с заданными скоростями.- Заводская лаборатория, 1981, т.47, № 12, с.49-52.
6. Морозов О.П., Попова Т.А. К вопросу об устойчивости мелкозернистой структуры аустенита конструкционной стали, формирующейся при фазовой  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристаллизации.- В кн.: Металлофизика, 1982, т.4, с.115-118.



7. Попова Т.А., Морозов О.П. О склонности к измельчению зеренной структуры аустенита конструкционных сталей при фазовой перекристаллизации.- В кн.: Прогрессивная технология термической обработки стали и титановых сплавов.- Пермь: ППИ, 1983, с.10-15.

8. Попова Т.А. Формирование и устойчивость мелкозернистой структуры аустенита в некоторых конструкционных сталях.- В кн.: Вопросы производства и обработки стали. Тематич.об.научн.трудов.- Челябинск: ЧПИ, 1983, с.107-114.

*Попов*