

обеспечила повышение категорийности проката до Д40 в соответствии с правилами Регистра.

### Список литературы

1. Браун М.П. Комплекснолегированные конструкционные стали. — Киев: Наукова думка, 1965. — 292 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 179 с.

© Маняк Н.А., 1999.

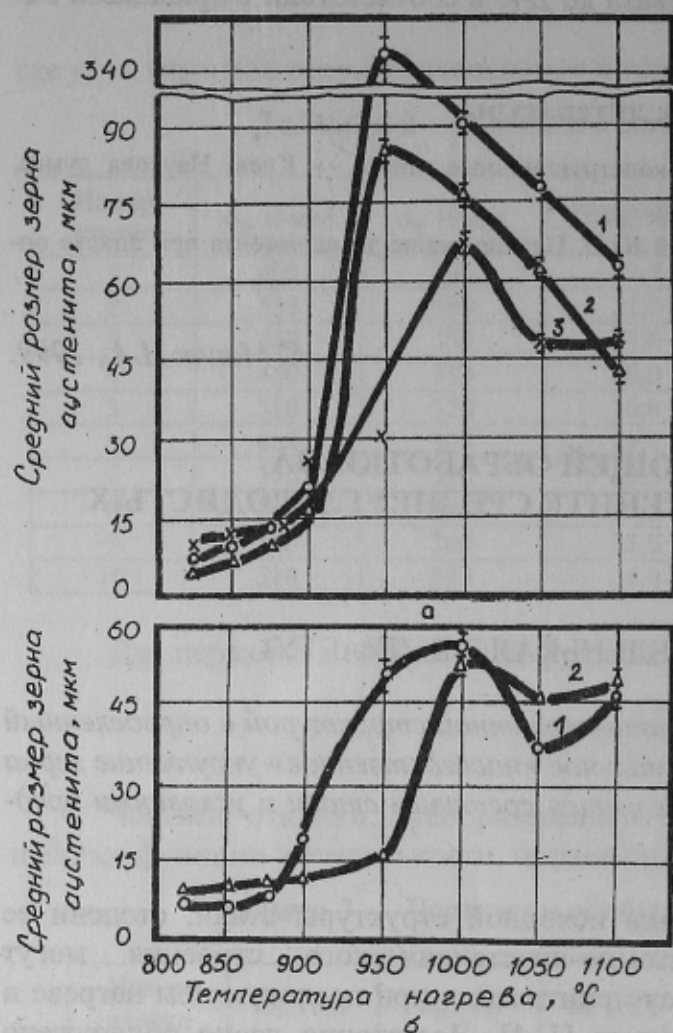
## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АУСТЕНИТЕ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

ГОРБАТЕНКО В.П., БЫКОВСКИХ С.В., БЕЛЕНЬКАЯ Т.В. (ДонГТУ)

*При нагреве сталей с исходной феррито-перлитной структурой в определенный температурный интервал происходит аномальное «наследственное» укрупнение зерна аустенита. Степень его проявления определяется составом стали и условиями предшествующей обработки.*

Известно, что в зависимости от типа исходной структуры стали, степени ее дисперсности, плотности дефектов атомно-кристаллического строения могут существенно изменяться условия процесса аустенитизации при последующем нагреве и кинетика структурных изменений в аустените [1–4]. Достаточно давно обнаружено явление структурной наследственности [2] для кристаллографически ориентированных структур. Ряд экспериментальных данных, полученных нами на сталях с исходной феррито-перлитной структурой [5] позволяет выдвинуть гипотезу об общности характера процессов структурообразования в аустените, сформировавшемся при превращении структур различного типа. Важность учета и направленного использования эффекта предшествующей обработки усиливается в связи с развитием различных видов деформационно-термического воздействия.

Ниже представлены результаты исследований, выполненных на конструкционных сталях 35 (0,40% С, 0,49% Мн, 0,17% Si, 0,021% S, 0,013% P), 35Ю (0,36% С, 0,49% Мн, 0,20% Si, 0,023% S, 0,012% P, 0,18% Al) и 30ЮТ (0,26% С, 0,49% Мн, 0,28% Si, 0,025% S, 0,025% P, 0,23% Al, 0,05% Ti), имеющих перед нагревом феррито-перлитную структуру. Стали предварительно подвергали различной деформационно-термической и термической обработке. Исходное аустенитное зерно выявляли травлением закаленных от заданной температуры нагрева образцов в насыщенном водном растворе пикриновой кислоты с добавлением ПАВ. Количественный металлографический анализ выполняли на анализаторе структуры «Эпиквант» в полуавтоматическом режиме. Образцы для исследований отбирали из одного бунта на различных стадиях передела. Нагрев образцов проводили в печи с заданной температурой с выдержкой 10 минут для сталей 35 и 35Ю.



**Рисунок 1** — Влияние температуры нагрева на средний размер зерна аустенита сталей 35 (а) и 35Ю (б) при исходном горячекатанном (1), патентованном (2) и холоднодеформированном (3) состояниях

Повышение температуры нагрева до 1000°C приводит к уменьшению доли площади, занятой такими крупными зернами, до 25–30%. При нагреве же до 1100°C такие зерна не регистрировали. В наследственно-мелкозернистой стали 35Ю наблюдали аналогичный характер изменения распределения аустенитных зерен по размеру на общем фоне измельчения структуры в сравнении с соответствующими режимами нагрева образцов из стали 35. При этом в структуре стали 30Ю не регистрировали зерна с размером более 200 мкм.

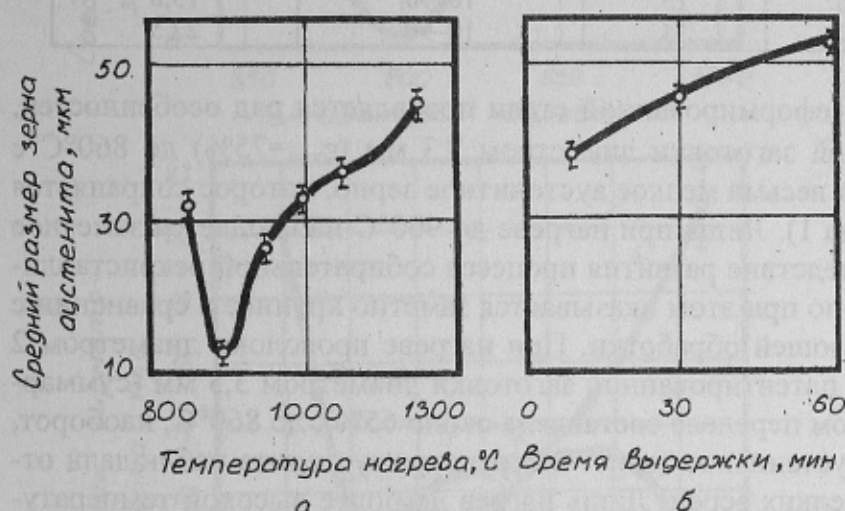
Аналогичный характер изменения зеренной структуры аустенита наблюдали и при нагреве другой наследственно-мелкозернистой стали 30ЮТ (рисунок 2). Нагрев до 950°C приводит к формированию относительно крупнозернистой структуры аустенита со средним размером зерна около 30 мкм. Повышение температуры нагрева до 1000°C способствует примерно двукратному уменьшению среднего размера зерна за счет появления большого количества мелких кристаллитов. Дальнейшее повышение температуры нагрева вплоть до 1200°C приводит к развитию процесса собирательной рекристаллизации, причем, даже при максимальной температуре средний размер зерна ока-

Из анализа данных, приведенных на рисунке 1, следует, что ход кривых изменения среднего размера зерна аустенита от температуры нагрева принципиально отличается от общепринятых представлений: в интервале температур 950–1000°C в зависимости от состава стали и условий предшествующей обработки наблюдается четко регистрируемый максимум, а при дальнейшем повышении температуры происходит заметное измельчение аустенитного зерна. Причем, эффект огрубления структуры аустенита в указанном температурном интервале и последующей рекристаллизации по механизму образования и роста зародышей оказываются более существенными в наследственно-крупнозернистой стали 35. После нагрева до еще более высокой температуры (выше 1050–1100°C) начинается новая стадия укрупнения аустенитного зерна по механизму собирательной рекристаллизации.

При относительно низких температурах нагрева (850–900°C) в структуре стали 35 преобладают мелкие аустенитные зерна поперечником 5–15 мкм. После нагрева до 950°C всего около 5% площади зерна занимают зерна поперечником до 200 мкм, а более 65% площади — зерна поперечником более 500 мкм.



зывается лишь на 20–25% большим, чем таковой, полученный при 950°C. Полученные экспериментальные данные (рисунок 2, б) показывают, что высокотемпературный (1200°C) нагрев стали с последующим охлаждением в нижнюю часть аустенитной области, например до 900°C, не приводит к «стабилизации» структуры аустенита. Увеличение длительности изотермической выдержки при более низкой температуре до 1 ч вызывает заметный, почти в 1,5 раза, рост зерна аустенита. Следует отметить, что аномальное укрупнение зерна аустенита при нагреве до определенных температур наблюдали и в случае обработки предварительно патентированной и холоднодеформированной стали (рисунок 1). Причем, характер хода кривых изменения среднего размера зерна аустенита от температуры нагрева в этом случае оказывается аналогичным таковому, наблюдаемому при обработке горячекатаных сталей. При этом температурные интервалы, в которых наблюдается максимальное укрупнение зерна аустенита, в основном, практически совпадают. Предварительное патентирование приводит к измельчению «восстановленного» аустенитного зерна. Предшествующая холодная пластическая деформация патентированной катанки из стали 35 приводит к дополнительному уменьшению максимального размера зерна аустенита и смещению температурного положения этого максимума от 950 до 1000°C (рисунок 1).



**Рисунок 2** — Влияние температуры нагрева (а) и длительности выдержки при температуре подстуживания 900°C после высокотемпературного нагрева до 1200°C (б) на размер зерна аустенита стали 30ЮТ

ного зерна при кратковременной (15 мин) выдержке при 860°C и последующее измельчение структуры аустенита при увеличении времени выдержки. Повышение температуры нагрева до 900°C обеспечивало не только завершение рекристаллизации аустенита по механизму первичной, но и приводило к началу процессов роста его зерна. Нагрев до 950°C способствует формированию крупного аустенитного зерна вследствие интенсивного развития процессов собирательной рекристаллизации.

При нагреве патентированной заготовки диаметром 3,3 мм (суммарная степень предшествующей холодной пластической деформации волочением около 75%) характер структурных изменений в аустените в общем подобен описанному выше случаю нагрева катанки (таблица 1). Однако при всех режимах аустенитизации зерно аустенита оказывается в этом случае заметно мельче. Признаки начала первичной рекристаллизации проявлялись уже при кратковременной выдержке при 860°C.

Обсуждаемый характер структурных изменений в аустените конструкционных сталей подтверждается и в ходе серии экспериментов, выполненных на катанке и проволоке из стали 35 с пониженным содержанием серы и фосфора (0,38% С, 0,55% Мн, 0,15% Si, 0,014% S, 0,014% Р). В данных экспериментах, кроме изменения температуры, использовали и временной фактор воздействия (таблица 1).

При обработке катанки из стали 35 наблюдали образование относительно крупного аустенит-

Таблица 1 — Влияние параметров нагрева и условий предшествующей обработки на размер исходного зерна аустенита стали 35

Исходное состояние стали	Температура нагрева, °C	Время выдержки, мин	Интервал измерения размера зерна, мкм	Средний поперечник зерна аустенита, мкм
Катанка	860	15	15–120	37,5
	860	60	10–125	18,5
	900	15	20–95	30,5
	950	15	45–155	60,5
Холоднодеформированная заготовка диаметром 3,3 мм	860	15	5–30	7,8
	860	60	5–30	8,2
	900	15	15–145	46,0
	950	15	45–125	53,5
Патентированная заготовка диаметром 3,3 мм	860	15	15–110	25,0
	860	60	10–95	16,3
	900	15	15–85	27,5
	950	15	20–130	31,5
Холоднодеформированная проволока диаметром 2 мм	860	15	10–120	18,5
	860	60	10–130	23,0
	900	15	10–90	15,8
	950	15	10–90	22,5

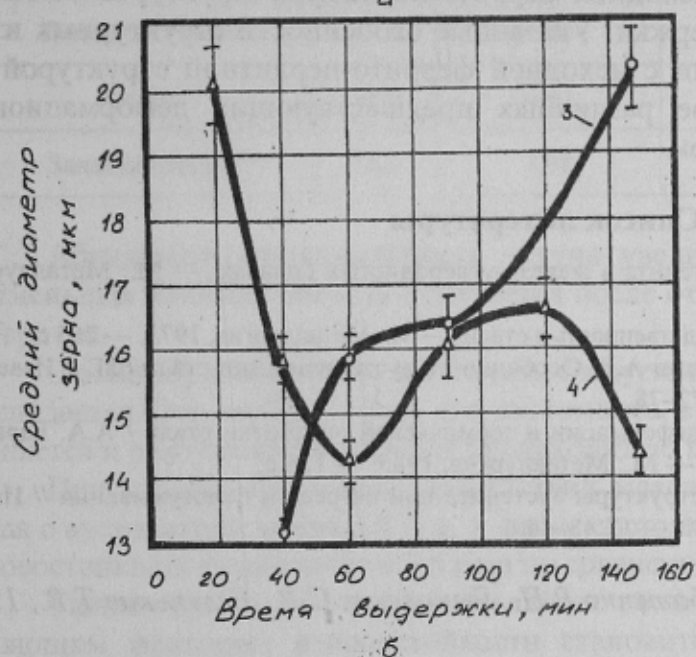
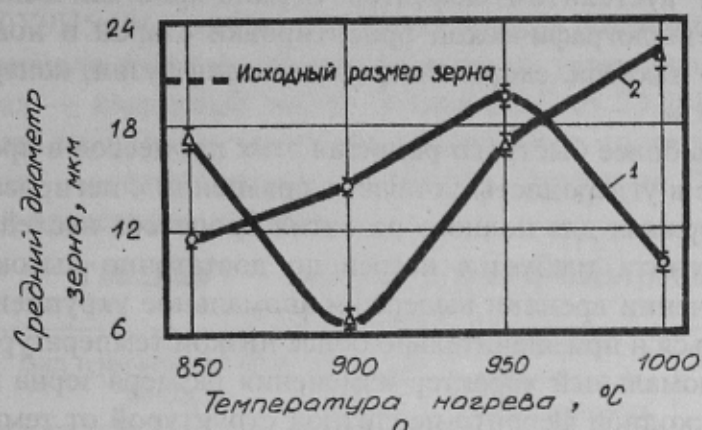
При нагреве же холоднодеформированной стали проявляется ряд особенностей. Так, при нагреве промежуточной заготовки диаметром 3,3 мм ( $\epsilon_{\text{хол}}=75\%$ ) до 860°C с выдержкой 15 мин формируется весьма мелкое аустенитное зерно, которое сохраняется и при выдержке 60 мин (таблица 1). Лишь при нагреве до 900°C наблюдается заметное укрупнение зерна аустенита вследствие развития процесса собирательной рекристаллизации. Причем, аустенитное зерно при этом оказывается заметно крупнее в сравнении с другими режимами предшествующей обработки. При нагреве проволоки диаметром 2 мм, полученной волочением из патентированной заготовки диаметром 3,3 мм (суммарная степень деформации при этом переделе составляла около 65%), до 860°C, наоборот, не фиксировали такое мелкое аустенитное зерно. В структуре аустенита наблюдали относительно небольшое число мелких зерен. Лишь нагрев до более высокой температуры приводит к достаточно интенсивному развитию рекристаллизации по механизму образования и роста новых зерен и, соответственно, измельчению структуры аустенита и повышению степени ее однородности по размеру зерна (таблица 1). Нагрев до 950°C обеспечивает развитие лишь начальных стадий собирательной рекристаллизации: зерно аустенита в этом случае оказывается самым мелким в сравнении с другими вариантами предшествующей обработки при аналогичных температурах.

В описанных выше экспериментах было практически невозможным зафиксировать величину первоначального (до нагрева) исходного аустенитного зерна. Ниже приведены результаты экспериментов, выполненных на предварительно перегретых образцах диаметром 15 мм из стали 30ЮТ (рисунок 3). В этом случае образцы горячекатанной стали нагревали до 1100°C, выдерживали 20 мин и охлаждали на воздухе либо в воде. Повторный нагрев выполняли до температур в интервале 800–1000°C с выдержкой от 20 до 150 мин. За размер первоначального исходного зерна аустенита принимали средний поперечник зерна, выявленного после закалки с предшествующего высокотемпературного нагрева.

Полученные в этом случае результаты в основном подтверждают обсуждаемые выше зависимости размера зерна аустенита от температуры нагрева и времени выдержки. При выдержке 20 мин нагрев стали до 950°C обеспечивал получение наиболее



крупного аустенита (рисунок 3, а, кривая 1), когда средний размер аустенитного зерна практически совпадает с величиной первоначального его зерна (около 21 мкм, штриховая линия). В случае более длительной выдержки (120 мин) наследственное восстановление исходного зерна аустенита, вероятно, происходит при более низкой температуре нагрева (около 850°C, кривая 2 на рисунке 3, а). В результате последующей рекристаллизации при нагреве до 900°C, формируется мелкозернистая структура аустенита со средним размером зерна почти в 2 раза меньшим, чем в случае выдержки длительно-стью 20 мин (рисунок 3). Такое неординарное различие в размере зерна в зависимости от длительности выдержки наблюдается и при нагреве до 950°C и устраняется лишь при более высокой температуре.



**Рисунок 3** — Влияние температуры нагрева (а) с выдержкой 20 (1) и 120 (2) мин и времени выдержки при 950°C (б) на средний размер зерна аустенита предварительно перегретой и охлажденной на воздухе (1–3) и в воде (4) стали 30ЮТ

Подтверждением возможности реализации более сложной в сравнении с общепринятой зависимости размера зерна аустенита от длительности изотермической выдержки являются и данные, приведенные на рисунке 3, б. Температура нагрева, равная 950°C, выбрана на основе приведенных выше данных, позволяющих заранее предполагать реализацию аномального хода кривых. В стали с исходной феррито-перлитной структурой увеличение длительности изотермической выдержки при 950°C до 60 мин приводит к измельчению аустенитного зерна. Лишь при более длительной выдержке наблюдается укрупнение зерна аустенита вследствие начала процесса собирательной рекристаллизации. Однако, даже и после выдержки длительностью 2–2,5 ч. средний поперечник зерна оказывается меньшим в сравнении с исходным и восстановленным зерном (рисунок 3, б, кривая 3).

При нагреве предварительно закаленной стали, наблюдали аналогичный характер хода кривой (рисунок 3, б). Однако, очевидно, восстановление исходного зерна аустенита в

этом случае происходит быстрее, и уже при выдержке длительностью 20 мин мы регистрируем начальные стадии процесса первичной рекристаллизации. Стадия нового укрупнения зерна также начинается раньше, при выдержке длительностью более 40 мин.

Процесс собирательной рекристаллизации развивается более интенсивно, в сравнении с обработкой стали с исходной феррито-перлитной структурой (рисунок 3, б, кривая 4).

Таким образом, приведенные экспериментальные данные позволяют сделать предположение о том, что наследственное формирование крупнозернистой структуры аустенита (по В.Д.Садовскому — «структурная наследственность») может реализоваться не только при нагреве стали, претерпевшей сдвиговое полиморфное превращение, но и имеющей исходную феррито-перлитную структуру. Кинетика развития обсуждаемых процессов и степень завершенности той или иной стадии на момент фиксирования состояния сплава определяются как температурно-временными параметрами термической обработки, так и химическим составом сплава. Это обусловлено различиями исходной плотности и степени наследования аустенитом дефектов атомно-кристаллического строения, степени соответствия кристаллографической ориентировки старой и новой фаз, уровня фазового и структурного наклепа, скорости процессов диффузии, контролирующих рекристаллизацию аустенита.

В связи с этим следует ожидать более быстрого развития этих процессов в предварительно закаленной стали, а также в углеродистых сталях в сравнении с легированными. При непродолжительных выдержках для полного развития процессов наследственного огрубления структуры аустенита требуется нагрев до достаточно высоких (950–1000°C) температур. При увеличении времени выдержки аномальное укрупнение зерна аустенита может регистрироваться и при значительно более низкой температуре.

Таким образом, установлен аномальный характер изменения размера зерна аустенита конструкционных сталей с исходной феррито-перлитной структурой от температуры нагрева и длительности выдержки. Указанные особенности структурных изменений в аустените при нагреве стали с исходной феррито-перлитной структурой наблюдали проявляющимися в случае различных предшествующих деформационно-термической и термической обработок.

### **Список литературы**

1. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железо-углеродистых сплавах. — М.: Металлургия, 1982. — 128 с.
2. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. — М.: Металлургия, 1973. — 205 с.
3. Баранов А.А., Куриц И.В., Яньшин А.В. Особенности аустенитизации стали 65Г // Известия АН СССР. — Металлы, 1989. — № 6. — С. 72–78.
4. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали / А.А. Баранов, А.А. Минаев, А.Л. Геллер, В.П. Горбатенко. — М.: Металлургия, 1985. — 128 с.
5. Горбатенко В.П. Об изменении структуры аустенита при нагреве и подстуживании // Известия вузов. Черная металлургия, 1992. — № 10. — С. 43–44.

© Горбатенко В.П., Быковских С.В., Беленькая Т.В., 1999.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ПРИ УДАРНО-АБРАЗИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

ПИЛЮШЕНКО В.Л. (ДонГАУ), ШАПОВАЛОВ Ю.С. (ДонГТУ)

*Изучены особенности ударно — абразивного изнашивания высоколегированных чугунов. Количество мартенсита деформации повышается с увеличением ударной нагрузки.*