

*Л. А. Мальцева, Т. В. Мальцева, А. В. Левина,
Н. Н. Озерец, В. А. Шарапова, С. А. Демидов*
УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург
m1a44@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Изучены особенности формирования структуры и физико-механических свойств сложнолегированной аустенитно-ферритной стали с различным исходным состоянием, подвергнутой большой деформации при высоком давлении с кручением (сдвигом) на наковальнях Бриджмена.

Ключевые слова: аустенит, δ -феррит, интерметаллидная фаза, мартенситное превращение, твердость, фазовый состав.

Peculiarities of structure and physic-mechanical properties of austenitic-ferrite steel with different initial states subjected to large deformation at high pressure torsion (shear) on Bridgman anvils studied at work.

Keywords: austenite, δ -ferrite, intermetallic phase, martensitic transformation, hardness, phase composition.

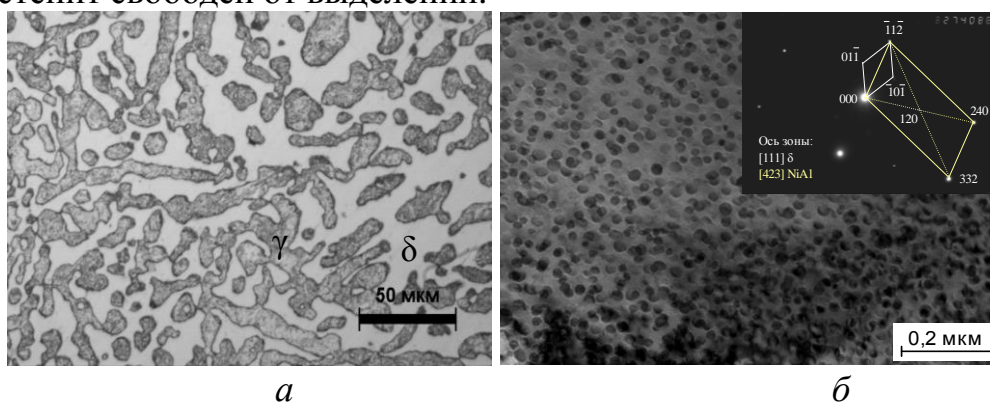
Аустенитно-ферритные стали находят широкое применение в различных отраслях современной техники. Однако промышленные дуплекс стали имеют ряд недостатков, такие как образование σ -фазы и 475-градусная хрупкость, которые накладывают существенное ограничение на технологические режимы их производства и области применения [1]. Разработанная новая аустенитно-ферритная сталь 03X13N10K5M2Ю2Т в связи с особенностями легирования лишена вышеуказанных недостатков промышленных дуплекс-сталей. Она содержит низкое содержание углерода $\leq 0,03$ %, пониженное содержание хрома до 13–14 %, по сравнению с 20–25 % у промышленных дуплекс-сталей, дополнительно легирована никелем, кобальтом и алюминием.

Ранее проведенные исследования на данной аустенитно-ферритной стали 03X14N10K5M2Ю2Т позволили разработать технологию получения высокопрочного состояния для пружин и упругих элементов представляющую последовательность следующих операций в технологическом цикле: закалка на пересыщенные γ и δ -твердые растворы, многопроходная холодная пластическая деформация волочением и последующее деформационное старение, которое проводят обычно на готовом размере. Известно [2], что интенсивная пластическая деформация (ИПД) давлением является

одним из способов получения высокопрочного состояния в сплавах в результате образования нанокристаллического или субмикроскопического состояния. Целью данной работы являлось изучение влияния деформации под высоким давлением со сдвигом на наковальнях Бриджмена на изменение структуры и свойств в аустенитно-ферритной стали 03X13H10K5M2Ю2Т с различным исходным состоянием, что позволило бы оценить потенциальные возможности и поведение новой исследуемой стали в условиях ИПД.

В качестве исходных состояний перед ИПД выбраны: традиционная закалка, закалка с последующим старением при температуре 500 °С, а также закалка с последующим перестариванием исследуемой стали при температуре 650 °С.

После всех вышеуказанных термических обработок структура исследуемой стали в исходном состоянии состоит, в основном, из двух фаз: δ -феррита, выделяющегося из жидкой фазы при охлаждении и аустенита (рис. 1, а), который является вторичной фазой. Как показали ранее проведенные исследования [3], соотношение между δ -ферритом и аустенитом сохраняется постоянным при нагреве под закалку в интервале температур 800...1050 °С и составляет $\approx 50 : 50$, но с повышением температуры нагрева выше 1100 °С увеличивается и при 1300 °С структура стали состоит практически из одного δ -феррита. Следует отметить, что δ -феррит исследуемой стали обладает аномально высокой твердостью (500 НВ), в то время как твердость аустенита невысокая (200 НВ). Методом электронной микроскопии установлено, что из δ -феррита выделяются достаточно дисперсные частицы сферической формы интерметаллидной фазы (Fe,Ni)Al с решеткой В2 (рис. 1, б) присутствие которых в δ -феррите приводит к его аномально высокой твердости как в закаленном, так и состаренном состояниях, в то время как аустенит свободен от выделений.



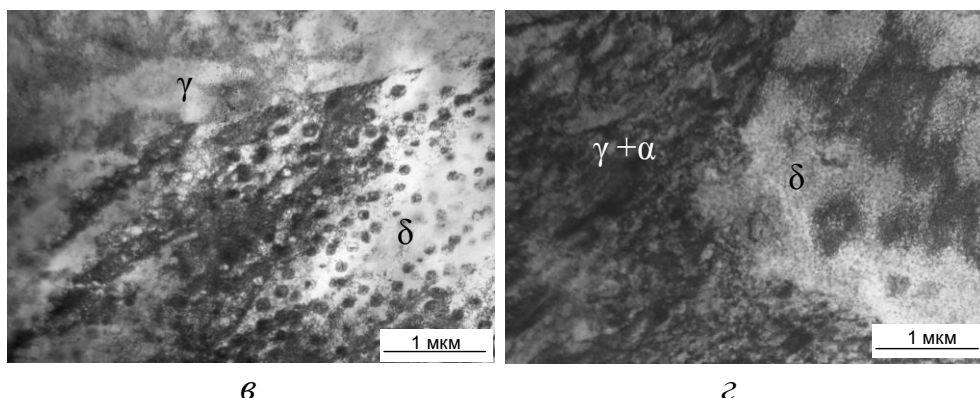


Рис. 1. Структура стали 03X13N10K5M2ЮТ: *а* – закалка от 1000 °С; *б* – закалка 1000 °С + старение 500 °С; *в* – закалка и давление 5 ГПа; *г* – закалка и давление 5 ГПа со сдвигом на $n = 5$ оборотов

Деформация при приложении давления 5 и 8 ГПа соответствует не-большой логарифмической степени деформации 0,675 и 0,734, соответственно, и не относится к интенсивным пластическим деформациям. Уже после таких обработок существенно изменяются фазовый состав и дислокационная структура фаз. Деформация приводит к разбиению кристаллов обеих фаз на более мелкие кристаллиты, разориентированные относительно друг друга, и это вызывает появление дифракционных картин с этих участков в виде практически кольцевых электроннограмм. Во всех матричных фазах наблюдается высокая плотность дислокаций. В δ -феррите видны частицы ранее выделившейся интерметаллидной фазы (Fe,Ni)Al, которые сохраняют свою четкую огранку как при величине приложенного давления 5 ГПа, так и 8 ГПа (рис. 1, *в*). Проведение ИПД при давлениях 5 и особенно 8 ГПа со сдвигом на $n = 5$ оборотов ($\epsilon \approx 30$) привело к интенсивному протеканию $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения с образованием мартенсита деформации, в структуре наблюдается в основном α -фаза. Можно отметить, что аустенитная фаза «наклепывается» значительно сильнее (при данной деформации микродифракция аустенита практически кольцевая), в то время как δ -феррит испытывает большее сопротивление деформированию вследствие его повышенной твердости.

Предварительное старение при температуре 500 °С образцов исследуемой аустенитно-ферритной стали приводит к дополнительному повышению прочностных свойств за счет старения δ -феррита и частично аустенита. Полученные электронно-микроскопические изображения образцов предварительно закаленной и состаренной при 500 °С стали 03X13N10K5M2ЮТ, подвергнутой ИПД под давлением показали, что аустенит продеформировался сильнее и в нем присутствуют дисперсные кристаллы мартенсита деформации (рис. 2, *а*). Интерметаллидные выделения в δ -феррите упорядоченные и при ИПД приобретают ромбическую форму с преимущественной кристаллографической направленностью (рис. 2, *б*). Проведение ИПД со сдвигом на $n = 5$ оборотов при высоких давлени-

ях 5 и 8 ГПа ($\epsilon \approx 30$) предварительно закаленных и состаренных при 500 °С образцов, имеющих более высокий уровень микротвердости привело к некоторому снижению интенсивности протекания $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и снижению доли образовавшегося мартенсита деформации.

Предварительно перестаренное исходное состояние (закалка + старения 650°, 1 час) привело к изменению соотношения фаз δ -феррита и аустенита, в сторону увеличения количества последнего, что привело при последующем ИПД к появлению фрагментированной структуры со средним размером ее элементов 45 нм (рис. 2, в). Здесь также наблюдается практически кольцевой тип микродифракции, который имеет более размытый вид, что связано с дальнейшим измельчением структуры (рис. 2, з).

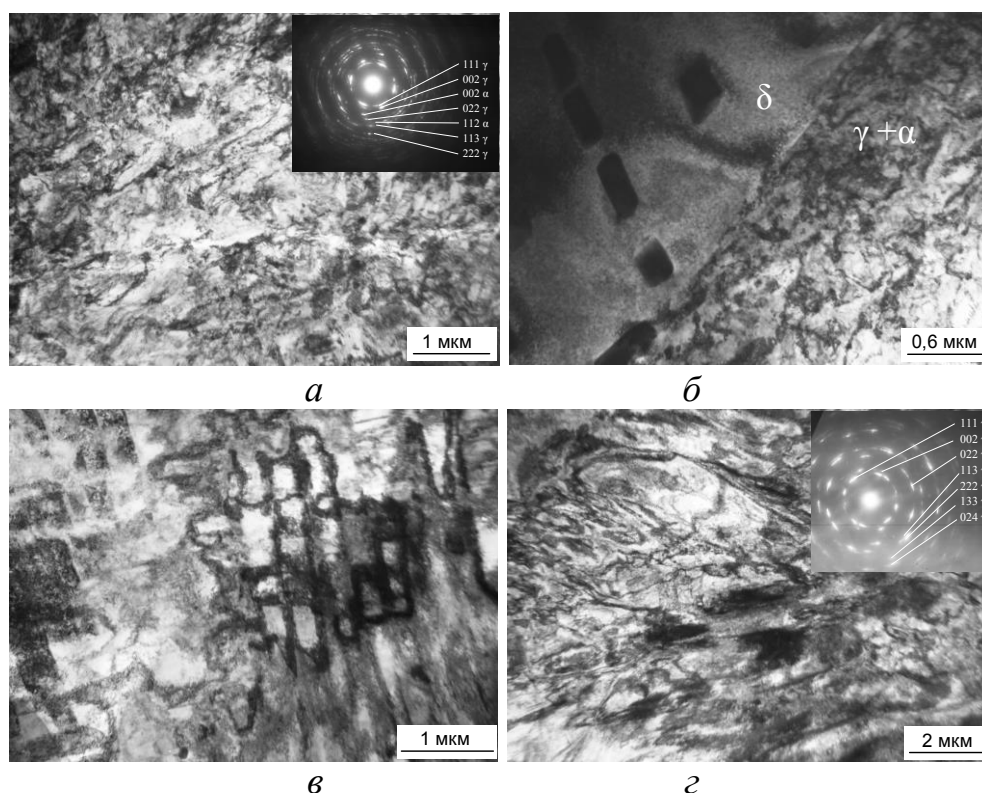


Рис. 2. Структура аустенитно-ферритной стали 03X13N10K5M2ЮТ после обработок: *а, б* – закалка + старение 500° + $P = 8$ ГПа, $n = 5$; *в, з* – закалка + старение 650° + $P = 8$ ГПа, $n = 5$

Проведенные исследования на аустенитно-ферритной стали 03X13N10K5M2Ю2Т показали, что использование после закалки, а также после закалки и старения при температурах 500 и 650 °С интенсивных пластических деформаций со сдвигом под высоким давлением 5 и 8 ГПа (эквивалентная деформация ≈ 30) на наковальнях Бриджмена выявило высокие потенциальные деформационные и технологические возможности новой аустенитно-ферритной стали. При достаточно сложных схемах нагружения не наблюдалось разрушения стали. Образуется упорядоченная и неупорядоченная модулированная структура в δ -феррите. Аустенит ис-

следуемой стали пластичен и при холодной пластической деформации испытывает $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, образуя мартенсит деформации. ИПД приводят к повышению микротвердости практически в 2 раза.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания (тема № Н977.42Г.024/14)*

Список литературы

1. Сокол И. Я. Двухфазные стали / И. Я. Сокол. М.: Металлургия, 1974. С. 216.
2. Валиев Р. З. Структура наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации / Р. З. Валиев // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1–2. С. 208–215.
3. Мальцева Л. А. Закономерности фазовых и структурных превращений в безуглеродистых высокопрочных сталях на Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Ni основе / Л. А. Мальцева // Журнал функцион. материалов. 2007. № 2. С. 75–79.