

# **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«Перспективные материалы с иерархической структурой  
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

1

DOI: 10.17223/9785946217408/78

**МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ  
ИНТЕНСИВНОЙ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКЕ**

<sup>1</sup>Сурикова Н.С., <sup>1,2</sup>Панин В.Е., <sup>1</sup>Наркевич Н.А., <sup>1</sup>Гордиенко А.И.

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Глубокая поперечно-винтовая прокатка металлических сплавов является перспективным методом интенсивной пластической деформации (ИПД) для получения длинномерных заготовок с субмикроструктурной структурой, обладающих повышенной прочностью в сочетании с достаточной технологической пластичностью. Часто она применяется в сочетании с другими методами ИПД – продольной прокаткой на гладких валках, равноканальным угловым прессованием и др. Микромеханизмы пластической деформации при поперечно-винтовой прокатке зависят от множества факторов и требуют дальнейшего изучения. Не до конца выясненными остаются вопросы о формировании напряженно-деформационного состояния в очаге деформации, о градиенте скоростей деформации в поперечном сечении заготовки, о влиянии моментных напряжений, способствующих формированию малоугловой субструктуры. Не изучены вопросы о динамической рекристаллизации, протекающей при высоких температурах прокатки, и ее зависимости от исходной структуры материала и параметров прокатки.

В работе методами механических испытаний и структурных (световой микроскоп марки Zeiss Axiovert 25, растровый электронный микроскоп Philips SEM 515, система с электронным и сфокусированным ионным пучком Quanta 200 3D, оснащенная приставкой NORDLYS Oxford Instruments HKL Technology для автоматического анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), электронный просвечивающий микроскоп JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ) исследований изучены деформационная структура, механические свойства и механизмы упрочнения аустенитной нержавеющей стали 12X15Г9НД после интенсивной поперечно-винтовой прокатки. Высокотемпературную многоступенчатую поперечно-винтовую прокатку стали с понижением температуры прокатки на 50<sup>0</sup> С на каждом следующем проходе проводили на трехвалковом министане винтовой прокатки в интервале температур 950÷750<sup>0</sup> С. Процедуру понижения температуры прокатки применяли для снижения скорости роста зерен в процессах динамической рекристаллизации.

При металлографическом исследовании продольного сечения прутка было установлено, что в результате поперечно винтовой прокатки формируется слоистая структура вдоль радиуса прутка, обусловленная неоднородностью процесса прокатки. Элементы на поверхности заготовки в местах контакта с валками испытывают максимальные напряжения – напряжение сжатия вдоль радиуса заготовки и вдоль винтовой траектории движения и напряжение растяжения поперек винтовой траектории. При каждом проходе прокатки в поверхностных объемах заготовки возникают моментные напряжения, градиенты скоростей деформации и направлений пластического течения. Это приводит к тому, что верхние слои материала подвергаются более интенсивной пластической деформации. Деформирующие напряжения в приосевой области заготовки в ~1,5 раза ниже, эта зона прорабатывается меньше и деформируется как при одноосной прокатке в калибрах, что приводит к вытягиванию структурных элементов.

В приповерхностных зонах наблюдаются структурные элементы глобулярной формы, границы которых представляют собой наследственные границы аустенита, измененные деформацией – преимущественно двойниковые границы исходного аустенита в процессе прокатки превращаются в границы общего типа. Электронно-микроскопические исследования тонкой структуры стали в поперечном и продольном сечении показали, что в указанных зонах, подвергающихся высоким деформирующим напряжениям прокатки, формируется почти равноосная субмикроструктурная структура со средним размером зерна  $d_{\text{зер}} \approx 0,7$  мкм, это значение близко  $d_{\text{зер}} \approx 0,58$  мкм, определенному методом EBSD. Измельчение зерна и

## Секция 2. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

появление малоугловой субструктуры в процессе прокатки при высоких температурах обусловлено динамической рекристаллизацией, скорость которой снижается по мере понижения температуры. Признаком динамической рекристаллизации служит наличие внутри почти равноосных зерен дефектной субструктуры – субзерен, дислокаций, дислокационных ячеек и дефектов упаковки. Размер субзерен составляет 0,2-0,6 мкм, размер ячеек – 8-55 нм. Наибольшая плотность ячеек наблюдается в непосредственной близости от большеугловых границ зерен, которые являются мощными источниками решеточных дислокаций. Прокатка при температурах 950, 900<sup>0</sup> и 850<sup>0</sup> С приводит к измельчению крупных карбидных частиц (их размер не превышал 0,5 мкм) и растворению мелких, поскольку температура растворения сложных карбидов типа Me<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и Me<sub>2</sub>C составляет ~ 820<sup>0</sup> С. Кроме основной карбидной фазы Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, в структуре проката наблюдаются мелкие (до 100 нм) включения карбидов (Fe, Mn)<sub>2</sub>C и (Fe, Mn)<sub>3</sub>C и карбонитрида хрома Cr<sub>2</sub>C<sub>0,61</sub>N<sub>0,39</sub>.

В приосевой зоне на металлографических картинах наблюдается полосчатое расположение структурных элементов – зерен, декорированных мелкодисперсными карбидными выделениями. Структурные элементы вытянуты вдоль направления, составляющего угол ~ 30<sup>0</sup> с осью прутка, однако EBSD-анализ показал отсутствие текстурных компонент. Электронная микроскопия показала, что субзерна, наблюдающаяся внутри вытянутых зерен центральной части прутка, имеют также вытянутую форму, ширина их составляет ~ 0,35 мкм, внутри них наблюдается высокая плотность дислокаций,  $\rho \sim 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Об интенсивном формировании малоугловой субструктуры в этой области свидетельствуют также результаты EBSD-анализа.

Механические испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре показали, что в образцах стали после поперечно винтовой прокатки предел текучести и предел прочности увеличивается на ~50 % ( $\sigma_{0,1} \approx 620$  МПа,  $\sigma_B \sim 1050$  МПа) при сохранении высокой пластичности до разрушения  $\delta \sim 45$  %. Такой эффект сохраняется и в интервале низких температур –80÷–20<sup>0</sup> С.

Можно сделать вывод, что в результате поперечно-винтовой прокатки в стали 12X15Г9НД формируется неоднородная по сечению прутка субмикроструктурная структура аустенита, которая характеризуется более высокой твердостью и прочностью, достаточной пластичностью и хорошей стабильностью.

Основными механизмами упрочнения аустенита при поперечно-винтовой прокатке являются: а) зернограничное упрочнение, обусловленное уменьшением размера зерна и увеличением объемной доли границ зерен (в соответствии с соотношением Холла-Петча); б) упрочнение связанное с изменением типа границ зерен после прокатки – от преимущественно двойниковых к границам общего типа; в) упрочнение, обеспеченное образованием развитой субзеренной структуры; г) упрочнение, обусловленное измельчением карбидной подсистемы; д) упрочнение, связанное с формированием в зернах дислокационных структур и дефектов упаковки.

Проведенные исследования показывают, что поперечно-винтовая прокатка может использоваться как самостоятельный эффективный метод ИПД для получения субмикроструктурного состояния в металлах и сплавах. Изменяя режимы прокатки (суммарную мощность главных приводов прокатного стана, интервал температур прокатки, угловую скорость вращения валков, скорость подачи заготовки) можно добиться хорошей проработки центральной зоны прутка, большей однородности деформационной структуры и степени ее упрочнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00221 и частично в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23. с использованием оборудования ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН и материаловедческого ЦКП ТГУ.