

# **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Физическая мезомеханика.  
Материалы с многоуровневой иерархически  
организованной структурой и интеллектуальные  
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения  
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН  
**академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках  
**Международного междисциплинарного симпозиума  
«Иерархические материалы: разработка и приложения  
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года  
Томск, Россия**

Томск  
Издательство ТГУ  
2020

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ  
ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Астафуров С.В., Астафурова Е.Г., Реунова К.А., Панченко М.Ю., Москвина В.А., Майер Г.Г., Мельников Е.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

В работе методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии исследованы микроструктура и фазовый состав ванадийсодержащей высокоазотистой стали, полученной путем проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (3D-печати). Для 3D-печати заготовок (стенки) использовались стальные прутки квадратного сечения следующего состава: Fe-21,6Cr-25,7Mn-1,4V-0,69C-1,18N (масс. %). В процессе аддитивного производства были получены стенки размером  $100 \times 30 \times 5$  мм с химическим составом: Fe-22,3Cr-19,9Mn-1,4V-0,69C-1,16N. Для определения механических свойств полученной при 3D-печати стали из заготовок вырезались образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части  $1,25 \times 2,7 \times 12$  мм. Ось растяжения таких лопаток совпадала с направлением осаждения слоев. Одноосное растяжение образцов проводилось при комнатной температуре с начальной скоростью деформации  $5 \times 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Для сопоставления с аддитивно-выращенным материалом использовали образцы литой стали после горячейковки и закалки в воду от температуры 1200°C.

Исходные литые образцы стали (в закаленном состоянии) имели структуру аустенита с высокой концентрацией атомов внедрения в твердом растворе (параметр решетки составлял 0,365 нм) и карбонитридами на основе ванадия и хрома. После аддитивного роста сталь также обладает преимущественно аустенитной структурой с карбонитридами на основе ванадия – на рентгенограммах наблюдаются линии с межплоскостными расстояниями, соответствующими  $\gamma$ - и (V,Cr)(N,C) фазам. То есть, несмотря на обеднение твердого раствора стали марганцем (от 26 масс. % до 20 масс. %), происходящее в процессе электронно-лучевой печати, сталь сохраняет структуру высокоазотистого аустенита. Это вызвано сохранением высоких концентраций азота, углерода и марганца в аддитивно-выращенной стали. Электронно-микроскопические исследования указывают на формирование крупнокристаллической структуры аустенита с вытянутыми в направлении роста стенки зернами (более 10 мкм шириной и до нескольких миллиметров в длину). Микроструктура внутри зерен имеет дендритное строение. Карбонитриды на основе ванадия и хрома располагаются равномерно в структуре стали, как по границам, так и в теле зерен, но вдоль границ также наблюдаются крупные (до 5 мкм) частицы неправильной формы, соответствующие интерметаллидной фазе (Cr,Fe,Mn,V), которая ввиду малой объемной доли не выявляется методом рентгенофазового анализа.

Результаты испытаний на одноосное растяжение показали, что образцы аддитивно-произведенной и исходной (литой) высокоазотистой стали характеризуются сопоставимым пределом текучести (850 МПа). При этом аддитивно-произведенный материал демонстрирует существенное снижение удлинения до разрушения (от 25% в литой стали до 2% в аддитивно-выращенной заготовке) и предела прочности (до 30%). Пластическая деформация развивается с более высоким коэффициентом деформационного упрочнения по сравнению с исходным материалом и сопровождается хрупким разрушением образцов при удлинении 2%, обусловленным присутствием интерметаллидной фазы в структуре стали. Постпроизводственная термообработка, заключающаяся в часовом отжиге при температуре 1200°C с закалкой в воду (стандартная обработка для формирования аустенитной структуры в высокоазотистых сталях), приводит к снижению предела текучести (на 10%) и предела прочности (на 13%) аддитивно-произведенной ванадийсодержащей высокоазотистой стали за счет гомогенизации аустенитных зерен, но из-за сохранения интерметаллидной фазы не сопровождается увеличением пластичности.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.7.*